МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

XIII МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФОТОНИКЕ И ИНФОРМАЦИОННОЙ ОПТИКЕ

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Москва

УДК 535(06)+004(06)
ББК 72г
Н 34

XIII МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФОТОНИКЕ И ИНФОРМАЦИОННОЙ ОПТИКЕ: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2024. – 664 с.

Сборник научных трудов содержит материалы докладов, включенных в программу XIII Международной конференции по фотонике и информационной оптике, проходившей 24-26 января 2024 г. в г. Москве. Тематика конференции охватывает широкий круг вопросов: когерентная и нелинейная оптика, оптика кристаллов, волоконная и интегральная оптика, взаимодействие излучения с веществом и оптические материалы, оптическая связь, цифровая оптика и синтез дифракционных оптических элементов, голография и оптическая обработка информации, оптоэлектронные устройства, прикладные вопросы оптики.

Ответственный редактор Родин В.Г.

Статьи получены до 30 ноября 2023 года.
Материалы издаются в авторской редакции.

ISBN 978-5-7262-3034-4

© *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2024*

Подписано в печать 31.01.2024. Формат 60×84 1/16.
Печ. л. 41,5. Тираж 40 экз. Заказ № 3.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Типография НИЯУ МИФИ
115409, Москва, Каширское ш., 31

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Председатели:

Гуляев Ю.В. – Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва

Евтихиев Н.Н. – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Вениаминов А.В. – Университет ИТМО, Санкт-Петербург

Вишняков Г.Н. – Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва

Волостников В.Г. – Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

Драчев В.П. – Сколковский институт науки и технологий, Москва

Козлов С.А. – Университет ИТМО, Санкт-Петербург

Комоцкий В.А. – Российский университет дружбы народов, Москва

Компанец И.Н. – Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

Криштоп В.В. – Пермская научно-производственная приборостроительная компания

Кульчин Ю.Н. – Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток

Кутанов А.А. – Институт физико-технических проблем и материаловедения НАН Кыргызской Республики, Бишкек

Лавров А.П. – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Потатуркин О.И. – Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск

Ромашко Р.В. – Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток

Рябухо В.П. – Национальный исследовательский Саратовский государственный университет

Сазонов С.В. – Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

Стариков Р.С. – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Твердохлеб П.Е. – Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск

Толстик А.Л. – Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Фетисов Ю.К. – МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

Шандаров С.М. – Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Председатель:

Кузнецов А.П. – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Ученый секретарь:

Родин В.Г. – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Адрес в Интернет: http://fioconf.mephi.ru/

СОДЕРЖАНИЕ

КОСОЛОБОВ С.С., СМИРНОВ А.С., ЗЕМЦОВА А.К., ЗЕМЦОВ Д.С., ВЕРГУЛЕС А.И., ПШЕНИЧНЮК И.А., ЖИГУНОВ Д.М., ТАЗИЕВ К.Р., ГАРБУЗОВ К.Н., ДРАЧЕВ В.П.
Технологии кремниевой интегральной фотоники.....29
БОБРОВ И.Б., СТРУЧАЛИН Г.И., ГОЛОЩАПОВ М.Ю., РОЗАНОВ А., КУЗЬМЕНОК Д.А., ЛОМОВ Е.В., СТРАУПЕ С.С.
Одиночные атомы в голографических массивах оптических микроловушек для задач квантовых вычислений.....31
ЛАРКИН И.А., ВАГОВ А.В., КРОИТОРУ М.Д., АКСТ В.М.
Супераномальный скин-эффект и усиленное поглощение света при отражении от проводящих сред.....33
ШУР В.Я., АХМАТХАНОВ А.Р., ЕСИН А.А., ЧУВАКОВА М.А., БОЙКО А.А.
Периодически поляризованные кристаллы и тонкие плёнки сегнетоэлектриков для преобразования частоты света.....35
ПУТИЛИН А.Н., ГЕЙВАНДОВ А.Р., ДУБЫНИН С.Е., ПУТИЛИН Н.А., СИМДЯНКИН И.В., КОПЁНКИН С.С.
Поляризационное реконфигурирование оптической схемы дисплеев дополненной реальности.....37
БИТЯЕВ Е.П., АГАПОВ Д.П., ФРОЛОВЦЕВ Д.Н., МАГНИЦКИЙ С.А.
Формирование поляризационного изображения объекта с линейной фазовой анизотропией методом квантовой фантомной поляриметрии.....39
ДАДЕНКОВ И.Г., ТОЛСТИК А.Л., МИКСЮК Ю.И., САЕЧНИКОВ К.А.
Импульсная запись динамических голограмм в кристалле силиката висмута для систем голографической интерферометрии.....41
СИМОНЯН Р.А., ШМАКОВ С.С., ШАНДАРОВ С.М., БУРИМОВ Н.И.
Исследование кристалла силиката висмута среза (111) методом адаптивной голографической интерферометрии.....43
ПОЖИДАЕВ Е.П., КУЗНЕЦОВ А.В., ЖУКОВИЧ-ГОРДЕЕВА А.А., ТОРГОВА С.И.
Электрооптические эффекты в ферриэлектрических и антисегнетоэлектрических фазах жидких кристаллов.....45
ДОЛГАНОВ П.В., БАКЛАНОВА К.Д., ДОЛГАНОВ В.К.
Жидкокристаллические фотонные структуры с многоуровневым упорядочением.....47
НОВИКОВ В.Б., ЗАГРАВСКИЙ А.К., СОТНИЧУК С.В., ДАВИДЕНКО Н.К., БОБРОВСКИЙ А.Ю., МУРЗИНА Т.В.
Гигантский эффект термической модуляции оптического пропускания в структурах ENZ-метаматериал/жидкий кристалл.....49

ДЕМУШКИН Д.Ю., ДЕНИСОВ Д.А., ГРИЩЕНКО И.В., ХОХЛОВ Н.А., КОНЯШКИН А.В., РЯБУШКИН О.А.
Измерение коэффициента оптического поглощения кристаллов литий-натриевого молибдата.....51
РОГАЛИН В.Е., ЖЕЛЕЗНОВ В.Ю., МАЛИНСКИЙ Т.В., ХОМИЧ Ю.В., АФОНИН Г.В., ХОНИК В.А.
Влияние воздействия наносекундными импульсами УФ-лазера на модуль сдвига монокристаллов алюминия.....53
КУРНИКОВ М.А., ШУГУРОВ А.И., БОДРОВ С.Б., БАКУНОВ М.И.
Черенковская схема генерации терагерцового излучения при оптическом выпрямлении в полупроводниковых кристаллах.....55
МАЛИНСКИЙ Т.В., ЖЕЛЕЗНОВ В.Ю., РОГАЛИН В.Е., ХОМИЧ Ю.В., КАПЛУНОВ И.А., ИВАНОВА А.И., ШАЙКИН А.А., СТУКАЧЕВ С.Е., СЕРГЕЕВ А.А., ИВАКИН С.В.
Влияние воздействия наносекундными импульсами неодимового лазера на монокристалл германия в водной среде.....57
ДИАБ М.О., ПОПОВА М.Н., БОЛДЫРЕВ К.Н.
Спектры люминесценции ионов Er^{+3} в кристалле K_2YF_5 для применений в люминесцентной криотермометрии.....59
ШУКЛОВ И.А.
Новые прекурсоры селена и теллура для получения коллоидных квантовых точек.....61
МАРГАРЯН И.В., БОРОДИНА Л.Н., ВЕДЕРНИКОВА А.А., УШАКОВА Е.В., ЛИТВИН А.П.
Модификация антирастворителя углеродными точками для повышения эффективности перовскитных солнечных элементов.....63
МИЛЕНКОВИЧ Т., ШУКЛОВ И.А., МАРДИНИ А.А., КОРОННОВ А.А., ХАКИМОВ К.Т., ПОПОВ В.С.
Влияние замены лигандов на свойства фоторезисторов на основе коллоидных квантовых точек халькогенидов ртути.....65
КОНОНОВ Д.В., ПАЛЕХОВА А.В., КОЧАКОВ А.В., АФАНАСЬЕВА А.В., ВАРТАНЯН Т.А., ДАДАДЖАНОВ Д.Р.
Усиление хемилюминесценции люцигенина в присутствии металлических наночастиц.....67
МУРАТОВ Д.А., НИКОЛАЕВ Н.Э., ЧЕХЛОВА Т.К.
Оптические свойства композитных сред, содержащих медные и золотые наночастицы различной формы.....69
КОН И.И., ПОЛТОРАБАТЬКО Д.А., ЗЮБИН А.Ю., САМУСЕВ И.Г.
Численное моделирование оптических свойств наночастиц золота методом конечных разностей во временной области (FDTD) 71
КОЧАКОВ А.В., МИТУСОВА А.А., КОНОНОВ Д.В., ДАДАДЖАНОВ Д.Р.
Спектроскопия золотых и серебряных наночастиц в раковых клетках.....73

ЕПИФАНОВ Е.О., РЫБАЛТОВСКИЙ А.О., ЮСУПОВ В.И., МИНАЕВ Н.В.
Формирование микроструктур из наночастиц серебра в нанопористых кварцевых стеклах фемтосекундным лазерным излучением.....75
ИЗБАСАРОВА Э.А., ГАЗИЗОВ А.Р., ПУДОВКИН М.С.
Вклад эффекта Парселла в люминесценцию наночастиц $Ce_{0.5}Y_{0.35}Tb_{0.15}F_3$ в условиях плазмонного усиления.....77
РЫБАЛКА А.Е., БЕЗУС Ю.А., РУМЯНЦЕВ В.В., ФЕДОРОВ С.А.
Взаимодействие электромагнитного излучения с неидеальной 1D фотонной структурой.....79
МАЛЫШЕВ О.К., МАРТЫНОВ И.Л., ЧИСТЯКОВ А.А.
Различные режимы оптического возбуждения полимера MDMO-PPV в микрорезонаторе из пористого кремния для детектирования молекул нитроароматических соединений.....81
ПОРТНОВА К.А., ШЕЛЕМАНОВ А.А., ЕВСТРОПЬЕВ С.К.
Формирование и разработка структуры пористых наноструктур ZnO-MgO с добавлением Cu(Mn) для интенсивной фотогенерации синглентного кислорода, фотокаталитических и антибактериальных применений.....83
МАКИН В.С., МАКИН Р.С.
Оптический скирмион как устойчивая квантовая топологическая структура при взаимодействии лазерного излучения с конденсированными средами.....85
ДОЦЕНКО А.А., НОВИКОВ В.Б., ЛЕОНТЬЕВ А.П., НАПОЛЬСКИЙ К.С., МУРЗИНА Т.В.
Динамика чирпированных фемтосекундных лазерных импульсов в ENZ-метаматериалах.....87
БУРЦЕВ А.А., ИОНИН В.В., КИСЕЛЕВ А.В., ЕЛИСЕЕВ Н.Н., МИХАЛЕВСКИЙ В.А., НЕВЗОРОВ А.А., ЛОТИН А.А.
Модуляция электрофизических свойств халькогенидных материалов воздействием импульсного оптического излучения.....89
МУРЗАКОВ М.А., ЕВТИХИЕВ Н.Н., ГРЕЗЕВ Н.В., КАТАЕВ Д.М.
Формирование сварных соединений металла и стекла при воздействии пикосекундных импульсов.....91
ЕГОРОВА К.А., РОЗАНОВ К.А., СИДОРОВА А.Д., ГОРЕНСКИЙ Ф.А., СИНЕВ Д.А.
Разработка методики формирования твёрдого поверхностного слоя на титане за счёт лазерной обработки под слоем углеродосодержащих веществ.....93
ВОРОБЬЕВ А.К., КАПРИДОВ Н.А., МОРОЗОВ Д.В., ШИТИКОВ А.Е., ЧЕРМОШЕНЦЕВ Д.А., БИЛЕНКО И.А.
Генерация частотных гребёнок в оптических микрорезонаторах с использованием двухчастотной накачки.....95
МОРОЗОВ Д.В., ВОРОБЬЕВ А.К., ДМИТРИЕВ Н.Ю., ЧЕРМОШЕНЦЕВ Д.А., БИЛЕНКО И.А.
Измерение дисперсионных характеристик и добротностей оптических микрорезонаторов.....97

ПАТОЛЯТОВ А.Д., ЩЕРБАКОВ Д.А., КОЛЫМАГИН Д.А., ВИТУХНОВСКИЙ А.Г.
Преломляющие рентгеновские линзы, изготовленные методом двухфотонной лазерной литографии.....99
МАМЯН К.А., ФРОЛОВ А.Ю., ПОПОВ В.В., ФЕДЯНИН А.А.
Усиление экваториального магнитооптического эффекта Керра в гибридных нанорешётках.....101
МИНАЕВ С.Е., АШИХМИН Д.И., СЕДОВА Ю.К., МИНАЕВ Н.В., ЮСУПОВ В.И.
Лазерный биопринтинг с использованием фемтосекундных лазерных импульсов.....103
ЛЕВУСЬ М.В., РИЗАЕВ Г.Э., ПУШКАРЕВ Д.В., СЕЛЕЗНЕВ Л.В.
Спектр плазменного канала, формирующегося при одноцветной филаментации ультракоротких лазерных импульсов, в терагерцовом диапазоне.....105
МОЛЬКОВ Т.С., ФАДЕЕВ С.В., МАРТЫНОВ И.Л., ПЛЕХАНОВ А.А., ЧИСТЯКОВ А.А.
Моделирование и изготовление методом лазерной абляции полосовых фильтров терагерцового диапазона.....107
БИКБАЕВ Р.Г., ЧЭНЬ Г.-П., ТИМОФЕЕВ И.В.
Динамическое управление световым пучком в двух пространственных направлениях с помощью таммовского плазмон-поляритона.....109
ПРОКОПОВА Д.В., АБРАМОЧКИН Е.Г.
Местоположение плоскости автофокусировки три-Эйри пучков в зависимости от параметра смещения.....111
ЦИПЛАКОВА Е.Г., ГРАЧЁВ Я.В., ПЕТРОВ Н.В.
Моделирование растрового сканирования с использованием системы «диафрагма-линза» в задаче детектирования широкополосных терагерцовых полей Бесселя–Гаусса.....113
СИДОРОВА М.Н., ВЫСЛАНКО И.С., ЕРМОЛАЕВ Г.А.
Эволюция точек с фазовыми особенностями в дихалькогенидах переходных металлов.....115
ЛЕВКОВСКАЯ В.М., ХАРИТОНОВ А.В., ХАРИНЦЕВ С.С.
Нестационарные оптические среды для реализации аналоговых вычислений.....117
ВАШУКЕВИЧ Е.А., ГОЛУБЕВА Т.Ю., БАШМАКОВА Е.Н.
Перепутывающие и нелокальные квантовые операции, основанные на QND-взаимодействии в светоатомных системах.....119
ЦУКАНОВ А.В.
Резонансное кулоновское взаимодействие экситонного и зарядового кубитов.....121
ЮНУСОВ Т.Р., ЧЕРМОШЕНЦЕВ Д.А., МАСАЛОВ А.В., БИЛЕНКО И.А.
Численное исследование эффективности работы интегральной когерентной машины Изинга.....123

САВЕЛЬЕВ М.В., АЛЕФЕРКИНА К.Е.
Влияние поворота слоя полидисперсной суспензии наночастиц на пространственные характеристики четырёхволнового преобразователя излучения.....125
ЦУКАНОВ А.В., КАТЕЕВ И.Ю.
Генерация пространственно-коррелированных фотонных состояний в оптической планарной структуре с квантовой точкой.....127
ШИРОКОВА А.В., МАСЛОВ А.В., БАКУНОВ М.И.
Материальные уравнения для поверхностных плазмонов на нестационарном графене.....129
БУХЕНСКИЙ К.В., ДЮБУА А.Б., КОНЮХОВ А.Н., КУЧЕРЯВЫЙ С.И., САФОШКИН А.С.
Распространение электромагнитного излучения в графеновых структурах...131
ЖЕЛЕЗНОВ В.Ю., МАЛИНСКИЙ Т.В., РОГАЛИН В.Е., ХОМИЧ Ю.В., КАПЛУНОВ И.А., ИВАНОВА А.И., ШАЙКИН А.А., СТУКАЧЕВ С.Е., СЕРГЕЕВ А.А., ИВАКИН С.В.
Влияние водной среды на эффективность воздействия наносекундными импульсами неодимового лазера на полированную поверхность бескислородной меди.....133
МИНАЕВА Е.Д., ЮСУПОВ В.И., МИНАЕВ Н.В.
Исследование влияния содержания воды в полимерных микрочастицах на качество спекания при формировании трёхмерных конструкций методом поверхностно-селективного лазерного спекания.....135
ШУБИН Я.Р., РАЗДОБАРИН А.Г., БЕЛОКУР А.А., ЕЛЕЦ Д.И., МЕДВЕДЕВ О.С., СМИРНОВА Е.В., СНИГИРЕВ Л.А.
Разработка комплекса лазерных диагностик первой стенки в термоядерных установках.....137
КАПРИДОВ Н.А., ШИТИКОВ А.Е., МИНЬКОВ К.Н., МАСАЛОВ А.В., ЧЕРМОШЕНЦЕВ Д.А., ЛЬВОВСКИЙ А.И., БИЛЕНКО И.А.
Методика осуществления мгновенной и долговременной стабильности частоты лазерного излучения.....139
УРЮПИНА В.К., КОТОВА С.П., ЛОСЕВСКИЙ Н.Н., МАЙОРОВА А.М., ЦЕЛОГОРОДЦЕВ К.А.
Формирование сложных конфигураций биологических объектов с фиксацией на подложке в схеме оптотермической ловушки.....141
КРИВЕЦКАЯ А.А., КУСТОВ Д.М., ЛЕВКИН В.В., ГОРБУНОВ А.С., ПАРШИН В.Д., УРСОВ М.А., ОСМИНИН С.В., ЕВЕНТЬЕВА Е.В., ВЕТШЕВ Ф.П., САВЕЛЬЕВА Т.А.
Интраоперационное применение оптико-спектрального метода оценки сатурации биологических тканей кислородом.....143
СУДАС Д.П., ЯКУЩЕВА Г.Г., КУЗНЕЦОВ П.И.
Использование резонанса затухающей моды для контроля химической стойкости покрытий оксида алюминия.....145

АРАКЕЛЯН С.М., БУХАРОВ Д.Н., ЗОТОВ А.И.
Определение оптических свойств биметаллической плёнки методом boxcount.....147
КУЦ Р.И., БЕЛОУСОВ Д.А., КОРОЛЬКОВ В.П., МАЛЫШЕВ А.И., САМЕТОВ А.Р.
Применение прямой лазерной записи на двуслойных плёнках a-Si/Cr для изготовления бинарных синтезированных голограмм.....149
БОРОДИНА Л.Н., ВЕНИАМИНОВ А.В.
Лазерная сканирующая микроскопия фотоиндуцированных преобразований люминесцирующих углеродных наночастиц и молекул.....151
ЦЕЛОГОРОДЦЕВ К.А., КОТОВА С.П., ЛОСЕВСКИЙ Н.Н., УРЮПИНА В.К.
Вихревые световые поля для оптической манипуляции ансамблями микрообъектов.....153
БУРКОВ А.С., ТЕРЕЩЕНКО Н.В., ЛАРИОНОВ И.А., ОБРОНОВ И.В., МЯСНИКОВ Д.В.
Исследование тепловых линз в оптических системах с мощным оптическим излучением с использованием метода Гершберга–Сэкстона.....155
САЗОНОВ С.В.
О генерации широкополосного терагерцового излучения методом оптического выпрямления.....157
ПОНОМАРЕВ Д.С., ЛАВРУХИН Д.В., ЯЧМЕНЕВ А.Э., СПЕКТОР И.Е., ЗАЙЦЕВ К.И.
Эффективная генерация терагерцовых импульсов в оптоэлектронных преобразователях на основе новых подходов.....159
ЗИМНЯКОВ Д.А., ВОЛЧКОВ С.С.
Усиление спонтанной флуоресценции в случайно-неоднородных средах: конкурирующее влияние времени жизни квантов флуоресценции в накачиваемой среде и радиационных потерь.....161
ВЕНИАМИНОВ А.В., БОРОДИНА Л.Н.
Люминесценция, диффузия и голография: лазерная сканирующая микроскопия и голографическая релаксометрия движения наночастиц и молекул.....163
ПОПОВ С.М., БУТОВ О.В., РЫБАЛТОВСКИЙ А.А.. РЯХОВСКИЙ Д.В., ЛИПАТОВ Д.С., ФОТИАДИ А.А., ЧАМОРОВСКИЙ Ю.К.
Высокоэффективный одночастотный случайный волоконный лазер, работающий в телекоммуникационном диапазоне длин волн.....165
МАГНИЦКИЙ Н.Д., ПУЮ П.В., МЯСНИКОВ Д.В.
Генерация мощного излучения зелёного диапазона от пикосекундного волоконного лазера.....167
ЛОБАНОВ А.И., СИРОТКИН А.А., КАЛАЧЕВ Ю.Л., ФИЛАТОВА С.А., КАМЫНИН В.А., ОВЧАРЕНКО Б.Д., ЦВЕТКОВ В.Б.
Гибридная оптоволоконно-твердотельная лазерная система усиления мощности с пикосекундным задающим генератором на длине волны 2086 нм.....169

ДЕНИСОВ А.Н., СЕМЁНОВ С.Л.
Влияние полимерного покрытия на изгибные потери полностью стеклянных микроструктурированных волоконных световодов.....171
ГАСИН А.С., СМОЖНЫЙ А.М., СУДАС Д.П., ГОЛАНТ К.М.
Влияние коэффициента обратной связи на параметры выходного излучения кольцевого волоконного лазера.....173
МАКОВЕЦКИЙ А.А., ПОПОВ С.М., РЯХОВСКИЙ Д.В., ЗАМЯТИН А.А.
“Резонансные” траектории косых лучей в многомодовых оптических волокнах.....175
ЯКИМУК В.А., КОМИСАРОВ В.А., ЯНДЫБАЕВА Ю.И., КОРОБКОВА У.Р., ВАРЖЕЛЬ С.В.
Запись волоконных брэгговских решёток методом фазовой маски с трансляцией лазерного пучка.....177
ВОСКАНЯН Г.Р., ГРИЦИЕНКО А.В., КУРОЧКИН Н.С.
Интеграция люминесцентных микрочастиц с оптическим волокном методом самозаписи.....179
ВЛАСОВ С.В., ИВАНОВ А.В., ИВАНОВ А.Д., МАЛЫШЕВ И.В., ПОПОВ М.В.
Тактильные сенсоры на основе оптических микроволокон.....181
КОМИСАРОВ В.А., ДМИТРИЕВ А.А., ВАРЖЕЛЬ С.В., ЯКИМУК В.А., КОЗЛОВА А.И., КАЛЯЗИНА Д.В.
Изготовление наклонных чирпированных волоконных брэгговских решёток с помощью интерферометра Тальбота.....183
ЗАБАЛУЕВА З.А., КОРЧАГИНА А.В., УШАКОВ Н.А.
Исследование внутренней структуры одномодовых оптических волокон при помощи спектральной оптической когерентной томографии.....185
ЗЫКИНА А.А., ПЛЯСЦОВ С.А., ГЛАДСКИХ И.А.
Моделирование волоконно-оптического датчика на основе поверхностного плазмонного резонанса и MMF-SMF-MMF волокна.....187
ГОРЛОВ Н.И., ТАЛАНОВ Д.А.
Распределённое волоконное зондирование на основе обратного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна.....189
ЮШИЦЫНА В.В., ПЛЁНКИН А.П.
Квантовое распределение ключей в системе «безопасный город» 191
МАКОВЕЦКАЯ Т.А., УШАКОВ Н.А.
Применение многофотонной спектральной интерферометрии для абсолютных оптических измерений.....193
ПРЖИЯЛКОВСКИЙ Я.В., СТАРОСТИН Н.И., МОРШНЕВ С.К., САЗОНОВ А.И.
Волоконно-оптический датчик для измерения тока плазмы в термоядерных реакторах.....195
АНПИЛОВ В.С., КОВАЛЕНКО Н.В., РЯБУШКИН О.А.
Волоконно-оптический гидрофон на основе полимерного интерферометра Фабри–Перо для регистрации лазерно-индуцированных кавитационных пузырьков в воде.....197

АХМЕРОВ А.Х., СЫЧЕВА С.Д.
Система неразрушающего контроля капиллярных объектов на основе активного квазираспределённого оптоволоконного акустического датчика..199
УС Н.А., АВЕРШИН А.А., ПЕЧЕНКИН Н.С., ДМИТРИЕВ В.К.
Волоконно-оптический разветвитель для лазерного гироскопа.....201
МОСКАЛЕВ Д.Н., КОЗЛОВ А.А., САЛГАЕВА У.О., КРИШТОП В.В., ВОЛЫНЦЕВ А.Б.
Применение полуаналитической модели к моделированию многомодового интерференционного делителя 2 × 2.....203
ВОХНИК О.М., ЗОТОВ А.М., КОРОЛЕНКО П.В., КУБАНОВ Р.Т., ПАВЛОВ Н.Н.
Фракталоподобные световые структуры: свойства и применения.....205
ПРОСОВСКИЙ Ю.О., ДЕНИСОВ Д.Г., ПРОСОВСКИЙ О.Ф., ИСАМОВ А.Н., СМОЛЬЯНИНОВ В.А., БУДНЕВ А.Ю.
Ключевые аспекты технологии получения многослойных интерференционных оптических покрытий.....207
САПЦОВА О.А., КОРОННОВ А.А., ЯКОВЛЕВ В.О., ПОПОВ В.С.
Измерительная установка для исследования фоточувствительности и быстродействия фотосенсоров в спектральном диапазоне 3 – 5 мкм.....209
СМОЛЬЯНИНОВ В.А., ПРОСОВСКИЙ Ю.О., ПРОСОВСКИЙ О.Ф., ПЕТРАЧКОВ Д.Н., ИСАМОВ А.Н., БУДНЕВ А.Ю.
Сравнительный анализ алюминиевых покрытий, полученных при различных условиях.....211
ДЕНИСОВ Д.Г.
Когерентные методы контроля рассеянного оптического излучения для измерения параметров качества поверхностей оптических деталей.....213
САРГСЯН А.С., ПАРФЕНОВ В.А.
Разработка концепции юстировки радиооптического телескопа РОТ-54/2.6.....215
ЛЕТОВА Е.Ю., ИВАНОВА Т.В., ЗАВГОРОДНИЙ Д.С.
Автоматизация предварительной обработки изображений тест-объектов для программно-аппаратного комплекса контроля качества оптических систем.....217
ШИПКО В.В., ПОЖАР В.Э., МАЧИХИН А.С.
Метод комплексного управления параметрами спектрального, пространственного и радиометрического разрешений в гиперспектальной системе мониторинга наземных объектов.....219
БОРИТКО С.В.
Использование непосредственной регистрации производных оптического спектра в спектрометрии.....221
КОТОВ В.М., АВЕРИН С.В.
Особенности передаточных функций акустооптического фильтра, работающего при низких частотах звука.....223

КАШАПОВ А.И., БЕЗУС Е.А., БЫКОВ Д.А., ГОЛОВАСТИКОВ Н.В., ДОСКОЛОВИЧ Л.Л.
Применение металлодиэлектрических слоистых структур для оптического выделения контуров изображений.....225
БЕЛОВ К.Н., КУНДИКОВА Н.Д.
Пространственная фильтрация фурье-образов как метод выявления дефектов в прозрачных материалах.....227
ВАСИЛЬЕВ С.В., ЖИГУЛИНА И.В., ДЕРБУШ Д.А.
Идентификация движения точечных объектов.....229
ПАВЛОВ А.В.
К вопросу реализации квантово-подобных моделей обработки информации методом голографии Фурье.....231
ЖИХОРЕВА А.А., БЕЛАШОВ А.В., СЕМЕНОВ А.А., БЕЛЯЕВА Т.Н., САЛОВА А.В., ЛИТВИНОВ И.К., КОРНИЛОВА Е.С., СЕМЕНОВА И.В., ВАСЮТИНСКИЙ О.С.
Количественная фазовая визуализация клеток и локализованное фотодинамическое воздействие с использованием пространственно-временного модулятора света.....233
ТРОПИНА Е.В., БОЛДЫРЕВ К.Н.
Спектроскопия плазмы крови человека: быстрая диагностика с использованием машинного обучения.....235
ПРОХОРОВ А.В., ГУБИН М.Ю., ШЕСТЕРИКОВ А.В., ТОКСУМАКОВ А.Н., НОВИКОВ С.М., КИРТАЕВ Р.В., ТАТМЫШЕВСКИЙ М.К., ЯКУБОВСКИЙ Д.И., ТИТОВА Е.И., ЖУКОВА Е.С., КАЗАРЯН Д.А., АРСЕНИН А.В., ВОЛКОВ В.С.
Гибридные и гетероструктурные ван-дер-ваальсовы метаповерхности для наблюдения коллективных и когерентных оптических эффектов.....237
БОЛДЫРЕВ К.Н.
Новые методы спектроскопии высокого разрешения и их применения в квантовых технологиях.....239
БЫКОВСКИЙ А.Ю.
Взаимная верификация данных автономными агентами, использующими классические и квантовые каналы связи.....241
ПЕТРОВ Н.В., РАБОШ Е.В., БАЛБЕКИН Н.С.
Подходы к оцифровке информации, содержащейся в изобразительных голограммах.....243
ПУТИЛИН А.Н., ДУБЫНИН С.Е., ПУТИЛИН Н.А. , КОПЁНКИН С.С., БОРОДИН Ю.П.
Влияние погрешностей изготовления волноводов на качество изображения в HMD на волноводных голограммах.....245
ГАНЖЕРЛИ Н.М., ГУЛЯЕВ С.Н., ИЛЬЮШИНА Д.А., МАУРЕР И.А.
Использование контрнаправленной схемы регистрации рельефно-фазовой поверхностной голографической структуры.....247

СОШНИКОВ Д.В., ДОСКОЛОВИЧ Л.Л., ПОРФИРЬЕВ А.П.
Градиентный метод расчёта каскадных ДОЭ и его применение в задаче классификации изображений.....249
ЧЕРНЫХ А.В., ЕЗЕРСКИЙ А.С., ЦИПЛАКОВА Е.Г., ПЕТРОВ Н.В., РАКОВ И.И., РАГИНОВ Н.И., КРАСНИКОВ Д.В., РАДИВОН А.В., КАТЫБА Г.М., БУРДАНОВА М.Г.
Повышение эффективности спиральных зонных пластин для генерации вихревых терагерцовых пучков.....251
ИВАНОВ П.А.
Корреляционный фильтр с обобщёнными ограничениями в задачах распознавания искажённых изображений.....253
СЦЕПУРО Н.Г., КОВАЛЕВ М.С., МИНИХАНОВ Т.З., ЗЛОКАЗОВ Е.Ю.
Измерение волновых аберраций с помощью голографического коррелятора изображения.....255
ИБРАГИМОВА Э.И., ПАВЛОВ И.Н.
Выделение артефактов на изображениях, полученных методом сканирующей ближнепольной оптической микроскопии.....257
МАНУЧАРОВ Д.Р., ПАВЛОВ П.В., ВЛАДИМИРОВ А.П.
Способ определения биологического загрязнения авиационного топлива методом цифровой спекл-фотографии.....259
ПРОХОРЕНКОВ Н.О., ВОЛЫНСКИЙ М.А.
Исследование фазовых артефактов в цветных цифровых голограммах Френеля.....261
СВИСТУНОВ А.С., РЫМОВ Д.А., КОЗЛОВ А.В., СТАРИКОВ Р.С., ЧЕРЁМХИН П.А.
Улучшение качества реконструкции изображений с голограмм, зарегистрированных в условиях различной освещённости, при помощи нейронных сетей.....263
БЕХТИН Ю.С., ЕЛМАНОВ А.В.
Восстановление изображений с помощью регуляризации функции размытия точки и активного обучения.....265
ОВЧИННИКОВ А.С., КРАСНОВ В.В., РЫМОВ Д.А., ШИФРИНА А.В., ЧЕРЁМХИН П.А., СТАРИКОВ Р.С.
Улучшение качества декодирования изображений с помощью нейросетей и пост-обработки в задачах оптического кодирования в пространственно-некогерентном излучении.....267
ГАВРУШКО В.В., КАДРИЕВ О.Р., ЛАСТКИН В.А.
Кремниевые дифференциальные фотоприёмники: технология, характеристики, применение.....269
ГОРЯЕВ М.А.
Влияние красителя на фотоЭДС в кремнии n- и p-типа.....271
АЙМУХАНОВ А.К., СЕЙСЕМБЕКОВА Т.Е., ТОЛЕГЕН Н.
Исследование фотоэлектрических характеристик ZnO в разных спиртовых растворителях.....273

ВЕСЕЛОВА В.О., ДУДКИНА Т.Д., ВОЛОДИН В.Д., ЕГОРЫШЕВА А.В.
Тонкослойный детектор альфа-частиц на основе $Bi_4Ge_3O_{12}$.....275
КАШИНА Р.Р., ДЕМИДОВ В.В.[1], НИКОНОРОВ Н.В.
Нанокомпозиты с добавлением комбинации Er/Yb для формирования тонкоплёночных покрытий внутри полого антирезонансного оптического волокна.....277
АБЕУОВ Д.Р. , РОЖКОВА К.С., АЙМУХАНОВ А.К.
Влияние наночастиц WS_2 на оптические свойства нанокомпозитных плёнок PEDOT:PSS.....279
КОРНЕЕВА А.А., БЫКОВ А.А., ЗИНИН П.В.
Применение алмазоподобных плёнок, полученных методом лазерного напыления.....281
ГАНГО С.Е. , НАГОВИЦЫН К.М., ПАНЬКОВА С.В., СОЛОВЬЕВ В.Г.
О возможности использования спектральной эллипсометрии в исследованиях оптических свойств синтетических алмазов.....283
ВОЙЦЕХОВСКИЙ А.В., ДЗЯДУХ С.М., ГОРН Д.И., ДВОРЕЦКИЙ С.А., МИХАЙЛОВ Н.Н., СИДОРОВ Г.Ю., ЯКУШЕВ М.В.
Влияние постоянной подсветки на электрические характеристики nB(SL)n-структур на основе HgCdTe.....285
МУСАБЕКОВА А.К., АЙМУХАНОВ А.К., ЖАҚАНОВА А.М., КАБДИЕВА А.У.
Влияние термического отжига на морфологию и структуру плёнок SnO_2.....287
ВАСИЛЮК Г.Т., КАРПАЧ П.В., МАСКЕВИЧ А.А., ГЛЕБОВИЧ Т.С., АЙТ А.О., ВЕНИДИКТОВА О.В., ВАЛОВА Т.М., МАСКЕВИЧ С.А.
Электронная структура ряда фотохромных диарилэтенов.....289
МУСАБЕКОВА А.К., АЙМУХАНОВ А.К., ЗИЯТ А.З., МУСАБЕК Н.К.
Влияние параметров термического отжига плёнок SnO_2 на фотовольтаические характеристики органических солнечных ячеек.....291
КАРПАЧ П.В., ВАСИЛЮК Г.Т., АЙТ А.О., ГОРЕЛИК А.М., МАСКЕВИЧ С.А.
Эффективность модуляции флуоресценции фотохромных нанокомпозитов на основе квантовых точек и хроменов.....293
ТАЖИБАЕВ С.К., БЕЙСЕМБЕКОВ М.К., БОКАНОВА А.А., БЕРИК А.А.
Исследование влияния толщины плёнок металлофталоцианинов на оптические характеристики.....295
БЕЗРУКОВ П.А., ПЕСНЯКОВ В.В., НАЩЕКИН А.В., СИДОРОВ А.И., НИКОНОРОВ Н.В.
Квантовая эффективность фотокаталитического разложения воды фрактальными наноструктурами AgI.....297
МАРАСАНОВ Д.В., ПЕСНЯКОВ В.В., САРАТОВСКИЙ А.С., СГИБНЕВ Е.М., НИКОНОРОВ Н.В.
Влияние концентрации бромида натрия на фотокаталитические свойства наноструктур Ag-AgBr в ионообменном слое натриевосиликатного стекла.....299

ШЕРЕМЕТ В.Г., БАБКИНА А.Н., ЗЫРЯНОВА К.С., КУЗЬМЕНКО Н.К.
Исследование влияния содержания оксида бора на структуру щёлочно-алюмоборатных стеклокерамик с хромом.....301
МИХАРЕВ Е.А., ЛУНЁВ А.Ю., СИДОРОВ А.И.
Оптически активные микросферы с модами шепчущей галереи из силикатного стекла с молекулярными кластерами серебра для задач сенсорики.....303
ЛУНЁВ А.Ю., МИХАРЕВ Е.А., СИДОРОВ А.И.
Численное моделирование влияния мощности накачки на дисперсию в микросферном резонаторе из фосфатного стекла, легированного Er^{3+} в ближней ИК-области.....305
БУЛЫГА Д.В., ЕВСТРОПЬЕВ С.К., ДЕМИДОВ В.В., ДУКЕЛЬСКИЙ К.В.
Исследование влияния дополнительного отжига на дефектную структуру кварцевого стекла методом люминесцентной спектроскопии.....307
ЛОСИН А.Л., БАБКИНА А.Н., ХАРИСОВА Р.Д., ЗЫРЯНОВА К.С., ДОЛГОПОЛОВ А.Д., СЕРГЕЕВ М.М.
Влияние энергии фемтосекундного лазерного излучения на люминесценцию нанокристаллов $CsPbI_3$ в борогерманатном стекле.....309
КУЧЕРЕНКО М.Г., НАЛБАНДЯН В.М.
Люминесценция квантовых точек вблизи плазмонных сфероидальных наночастиц в магнитном поле.....311
РОЗЕНТАЛЬ С.Р., БАБИЧ Н.С., КИСЛОВ Д.А.
Оптомеханика наночастиц в гибридном анапольном состоянии.....313
ПАЛЕХОВА А.В., БОНДАРЕНКО А.Г., КОНОНОВ Д.В., ВАРТАНЯН Т.А., ДАДАДЖАНОВ Д.Р.
Исследование влияния формы и размера наночастиц серебра и золота на плазмонно-усиленную хемилюминесценцию люминола.....315
ЧМЕРЕВА Т.М., КУЧЕРЕНКО М.Г., МУШИН Ф.Ю.
Спазер на основе цилиндрической нанопроволоки с диэлектрическим сердечником и плазмонной оболочкой.....317
ЖИВАГО Е.Р., ПЛЕХАНОВ А.А., ЧИСТЯКОВ А.А.
Математическое моделирование терагерцовых спектров отражения азотсодержащих органических соединений в частотных областях характеристических полос поглощения.....319
МИНИБАЕВ А.И., ХАРИНЦЕВ С.С.
Определение плотности фононных состояний из калориметрических измерений.....321
ХОПЁРСКИЙ А.Н., НАДОЛИНСКИЙ А.М., КОНЕЕВ Р.В.
Фотон-фотонное рассеяние в поле атомного иона.....323
КОРОВАЙ О.В., МАРКОВ Д.А., НАДЬКИН Л.Ю.
Влияние многофотонных переходов на закон дисперсии экситон-поляритонов.....325
ЯДРИХИНСКАЯ Д.Р., ФИЛАТОВ В.В.
Формирование правильной кристаллоподобной гравитационной структуры в резонансной фотонной ловушке.....327

КАБИСОВ А.М.
Аннигиляция пары электрон-позитрон в гравитационном поле.....329
КАРЦЕВ П.Ф., КУЗНЕЦОВ И.О.
Кинетика возбуждений в электронном газе при возбуждении оптическим импульсом: численное моделирование с высоким разрешением по энергии.....331
КОПЫЛОВ С.В.
Исследование влияния модификации оператора Даламбера на массовые характеристики уравнения Клейна–Гордона–Фока.....333
ВАСИЛЬЕВА О.Ф.
Временная эволюция оптического параметрического нелинейного осциллятора на экситон-диполяритонах.....335
ВОЛКОВА В.В., ФИЛАТОВ В.В.
Кольцевая резонансная фотонная ловушка для исследований в электромагнитных полях высокой интенсивности.....337
АСТАШКЕВИЧ С.А., КУДРЯВЦЕВ А.А.
Самосогласованное моделирование натрий содержащей резонансной фотоплазмы для контура Фойгта.....339
АСТАШКЕВИЧ С.А.
Анализ влияния длины цилиндрической ячейки на параметры фотоплазмы.....341
КУЛАГИНА М.А., ФИЛАТОВ В.В.
Моделирование оптических свойств одномерной периодической акустоиндуцированной фотонной среды.....343
ХОПЁРСКИЙ А.Н., НАДОЛИНСКИЙ А.М., КОНЕЕВ Р.В.
Расщепление фотона атомным ионом.....345
ГАВРИЛОВЕЦ Д.А., КОТОВА А.Д., РАСИХИНА П.Д., ФИЛАТОВ В.В.
Фотонные кристаллы для гиперкомбинационных исследований в звуковых полях.....347
ЧИНЬ Н.Х., ШЕПЕЛЕВ С.П., ШАРИКОВ Д.А., ПАТАПОВИЧ М.П.
Изучение влияния параметра расфокусировки сдвоенных лазерных импульсов на создание качественных наноструктур, напылённых на различные виды поверхности.....349
ГАВРИШ С.В., КИРЕЕВ С.Г., ПОТАПЕНКО А.О., ШАШКОВСКИЙ С.Г.
Эрозия кварцевой оболочки импульсной ксеноновой лампы под воздействием плазмы и УФ-излучения.....351
ЧИНЬ Н.Х., КОСТРЮКОВА Я.С., ТАЛЕРОНОК Ю.В., ЖЕВНЯК И.С., ПАТАПОВИЧ М.П.
Исследование процесса создания газочувствительных покрытий при воздействии сдвоенных лазерных импульсов на мишени, содержащие в своём составе олово и медь.....353
ОРЕХОВА Н.А., ПУХТЕЕВ А.О., ХАРИТОНЧИК Р.А., ЗАЖОГИН А.П.
Исследования структуры образца железного метеорита методом лазерной атомно-эмиссионной многоканальной спектрометрии.....355

ЧИНЬ Н.Х., БОГДАН Е.В., ШАТСКИХ С.М., ПАТАПОВИЧ М.П.
Атомно-эмиссионная многоканальная спектрометрия двух-, трёх- и многокомпонентных сплавов.....357
ОРЕХОВА Н.А., ПУХТЕЕВ А.О., ХАРИТОНЧИК Р.А., ЗАЖОГИН А.П.
Анализ состава каменной части метеорита Брагин и оливина методом лазерной атомно-эмиссионной спектрометрии.....359
МАВРЕШКО Е.И., УЛЬЯНОВ Я.В., ТАРАКАНОВ Е.Д., РУДЫЙ А.В.
Отечественная технология производства лазерной керамики.....361
РУДЫЙ А.В., УЛЬЯНОВ Я.В., ТАРАКАНОВ Е.Д., МАВРЕШКО Е.И.
Анализ и оценка исходных образцов иттрий-алюминиевой лазерной керамики, легированной Nd^{3+}:YAG.....363
УЛЬЯНОВ Я.В., ТАРАКАНОВ Е.Д., РУДЫЙ А.В., МАВРЕШКО Е.И.
Исследование отечественной композитной керамики Nd^{3+}:YAG/Cr^{4+}:YAG для компактных импульсных лазеров с диодной накачкой.....365
ТАРАКАНОВ Е.Д., УЛЬЯНОВ Я.В., РУДЫЙ А.В., МАВРЕШКО Е.И.
Исследование эффективности Nd^{3+}:YAG-керамики на государственном лазерном полигоне «Радуга».....367
ПРИВАЛОВ В.Е., ШЕМАНИН В.Г.
Лазеры: измерения, информация, энергетика.....369
ЗАГОРУЛЬКО К.А., КОЗЛОВ А.В., УШАКОВ Ф.А., ГАТАТДИНОВ А.Р., ХАТЫРЕВ Н.П.
Исследования амплитудных шумов одночастотных лазеров.....371
ТЕТЕРИН Е.П., АНИСИМОВА С.А.
Влияние «фантомного» электромагнитного поля на излучение полупроводникового лазера.....373
МАКИН В.С., МАКИН Р.С.
Поляритонная модель образования суправолновых структур аномальной ориентации на полупроводниках под действием лазерного излучения.....375
ВОРОПАЙ Е.С., КОВАЛЕНКО М.Н., АЛЕКСЕЕНКО Н.А., ЗАЖОГИН А.П.
Особенности процессов формирования состава лазерного факела при воздействии сдвоенных лазерных импульсов на двухслойные металлические мишени в атмосфере воздуха.....377
КОВАЛЕНКО М.Н., АЛЕКСЕЕНКО Н.А., ВОРОПАЙ Е.С., ЗАЖОГИН А.П.
Исследование процессов получения нанопорошков оксидов меди с серебром при лазерном распылении гибридной мишени в атмосфере воздуха.....379
ПЕРМЯКОВА И.Е., ИВАНОВ А.А., ЧЕРНОГОРОВА О.П.
Короткоимпульсная лазерная обработка аморфных сплавов.....381
АШАРЧУК Н.М., МАРЕЕВ Е.И.
Динамика механических пост-эффектов, индуцированных фемтосекундными лазерными импульсами в сверхкритическом диоксиде углерода.....383
ЕГОРОВ А.Н., МАВРИЦКИЙ О.Б., ПЕЧЕНКИН А.А., ХОЛИНА М.С.
Переходные процессы в приборах на основе широкозонных полупроводников при фемтосекундном многофотонном лазерном возбуждении.....385

РЕШЕТОВА М.В., МИНАЕВ Н.В.
Разработка метода настройки системы пространственно-временной фокусировки для оптимизации формы вокселя в технологии двухфотонной 3D-печати.....387
ХАЧАТРЯН Д.А., ШЕЛЯКОВ А.В., СИТНИКОВ Н.Н., БОРОДАКО К.А.
Микромеханический инструмент на основе обратимого эффекта памяти формы.....389
КОВАЛЕНКО А.Ф.
Обоснование неразрушающих режимов импульсного лазерного отжига неметаллических пластин.....391
МОЖАЕВА М.Д., КОРШУНОВ А.А., ГАРМАТИНА А.А., АШАРЧУК Н.М., РОВЕНКО В.В., МАРЕЕВ Е.И., МИНАЕВ Н.В.
Поиск путей повышения выхода рентгеновского излучения из лазерной плазмы, создаваемой при воздействии остросфокусированного пучка фемтосекундного волоконного лазера на медную мишень.....393
КОРШУНОВ А.А., МОЖАЕВА М.Д., АШАРЧУК Н.М., РОВЕНКО В.В., МАРЕЕВ Е.И., МИНАЕВ Н.В.
Технические аспекты разработки источника характеристического рентгеновского излучения на основе фемтосекундного волоконного лазера.....395
ВОРОПАЙ Е.С., КОВАЛЕНКО М.Н., АЛЕКСЕЕНКО Н.А., ЗАЖОГИН А.П.
Исследование процессов при напылении наноплёночных резисторов из оксидов цинка, легированных медью, при лазерном распылении цинка и меди в атмосфере воздуха.....397
КОВАЛЕНКО М.Н., АЛЕКСЕЕНКО Н.А., ВОРОПАЙ Е.С., МАРКОВА Л.В., ЗАЖОГИН А.П.
Исследования процессов получения нанопорошков-прекурсоров для получения нанокерамик типа $Fe_xMg_{1-x}Al_2O_4$, при воздействии на сплавы АМг2 и Мг95 сдвоенными лазерными импульсами в атмосфере воздуха.....399
СЕДОВА Ю.К., МИНАЕВ С.Е., ЕПИФАНОВ Е.О., ЖУЧКОВА Д.В., СЫСОЛЯТИН С.П., МИНАЕВ В.П., ЮСУПОВ В.И., МИНАЕВ Н.В.
Перспективы использования импульсного лазера на ТМ-активированном волокне для литотрипсии слюнных камней.....401
ТИМЧЕНКО П.Е., ТИМЧЕНКО Е.В., РЯБОВ Н.А., ФРОЛОВ О.О., ВОЛОВА Л.Т., ИВАНОВ С.С.
Комплексный оптический метод оценки состава гидрогелей на основе тканей человека для 3D-биопринтинга.....403
РУДИ П.А., ЕФРЕМОВ А.Г., РОГОЖНИКОВ Г.С.
Исследование спектральных особенностей биологических тканей в миллиметровом диапазоне длин волн.....405
ВОЙТЕШОНОК Ю.В., ШИТЦ Д.В.
Медицинский озонатор циклического типа для обработки септических ран.....407

ТИМЧЕНКО Е.В., ТИМЧЕНКО П.Е., АЛЕХИН М.С., ПИСАРЕВА Е.В., ВЛАСОВ М.Ю., ФРОЛОВ О.О., КЛЕНОВА Н.А.
Оптические методы оценки состава комбинированных материалов на основе бактериальной биоцеллюлозы.....409
БЕЛАШОВ А.В., ЖИХОРЕВА А.А., БЕЛЬТЮКОВА Д.М., БЕЛЯЕВА Т.Н., САЛОВА А.В., ЛИТВИНОВ И.К., КОРНИЛОВА Е.С., СЕМЕНОВА И.В., ВАСЮТИНСКИЙ О.С.
Исследование влияния фотодинамического воздействия на параметры флуоресценции фотосенсибилизатора радахлорин в живых клетках в результате частичного фотообесцвечивания.....411
ИТЯКСОВ Ю.Д., ТИМЧЕНКО П.Е., ТИМЧЕНКО Е.В., ФРОЛОВ О.О., ПИСАРЕВА Е.В., ТЧАНГ Э.М., ЛЕМБА И.Н., ВЛАСОВ М.Ю.
Оптический метод оценки костной ткани животных при одно- и двукратном введении минерального костного компонента.....413
СТЕПАНОВА О.В., КОНОПЛЕВ Г.А., КУЗНЕЦОВ А.И., КОРСАКОВ В., СТЕПАНОВА О.С., ЛЯЛИН Д.О., ЛЫФАРЬ Н.С., ФРОРИП А.
Применение оптического сенсора, основанного на быстрой жидкостной хроматографии белков и метаболитов, для оценки свежести рыбы.....415
ШУЛБАЕВА Д.С., КЛЫЧКОВ А.М., РОГОЖНИКОВ Г.С.
Диагностика злокачественных образований с использованием широкополосной видимой и инфракрасной спектроскопии.....417
ТИМЧЕНКО Е.В., ТИМЧЕНКО П.Е., ЛЯМИН А.В., БАЖУТОВА И.В., ТРУНИН Д.А., ФРОЛОВ О.О., ВОЛОВА Л.Т., ЗОТОВА А.В.
Рамановская спектроскопия для экспресс-диагностики стафилококков при пародонтите.....418
ЗУБАРЕВА С.Р., КУНДАЛЕВИЧ А.А., ЗЮБИН А.Ю., САМУСЕВ И.Г.
Исследование балтийского янтаря методом спектроскопии комбинационного рассеяния света.....420
УШАКОВ А.А., МАМАЕВА К.А., РОМАНОВ С.А., ДОЛМАТОВ Т.В., ЧИЖОВ П.А., ШЕВЛЮГА В.М., БУКИН В.В., ГАРНОВ С.В.
Генерация терагерцового излучения при сверхсветовой разрядке плоского вакуумного фотодиода.....422
НИКОЛАЕВА И.Н., КОСТРОМЫКИНА В.В., РОГОЖНИКОВ Г.С.
Исследование распространения излучения терагерцового диапазона частот в многослойных диэлектрических структурах.....424
КОНОВ Ю.В., ПЫХТИН Д.А., БИКБАЕВ Р.Г., ТИМОФЕЕВ И.В.
Фотодетектор горячих электронов для телекоммуникационной области спектра на основе таммовского плазмон-поляритона.....425
ЛЕОНИДОВА А.А., ПРОКУРАТОВ Д.С., МАРАСАНОВ Д.В., НИКОНОРОВ Н.В.
Исследование профиля распределения серебра в ионообменном волноводе методом лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии.....427

ЛЯХОМСКАЯ К.Д.
Влияние коэффициентов связи световодов и коэффициента усиления на особенности распространения излучения в бесконечном массиве световодов.....429
ГУРЬЕВ Д.А., НИКОЛАЕВ Н.Э., ПУСТОВАЛОВ А.В., РАВИН А.Р., ЦВЕТКОВ В.Б., ЧЕХЛОВА Т.К.
Исследование оптических градиентных волноводов на основе активного стекла.....431
ОТРОХОВ С.Ю.
Переходные зоны для вытекающих мод в планарных W-световодах.....433
КОРНИЛИН Д.А., ПОНОМАРЕВ Р.С., ДЕМИН В.А.
Влияние толщины буферного слоя на форму линзованных оптических волокон.....435
МИРУЩЕНКО М.Д., КОСОЛАПОВА К.Д., ЧЕРЕВКОВ С.А., САНДЖИЕВА М.А., УШАКОВА Е.В.
Светоизлучающие диоды на основе углеродных точек из бензойной и лимонной кислот.....437
ВЕКШИН М.М., ЯКОВЕНКО Н.А.
Разработка интегрально-оптического трёхканального модового мультиплексора на основе ионообменных волноводов в стекле.....439
БОГАЧКОВ И.В., ГОРЛОВ Н.И.
Распределённое волоконное зондирование на основе обратного рассеяния Рэлея.....441
БОЛОТОВ Д.В., КОЛЕСНИКОВ О.В.,КАЗАНЦЕВ С.Ю., ШУЛЬГА М.И.
О стабильности промышленных систем квантового распределения ключа при воздействии внешнего магнитного поля на волоконно-оптическую трассу.....443
ГАРКУШИН А.А., СТОРОЖЕВ С.А., УРБАНОВИЧ Е.В., ВОЛЬХИН И.Л., НИФОНТОВА Е.В., КРИШТОП В.В.
Применение широтно-импульсной модуляции в алгоритме поиска оптимальной оптической мощности в системе POWER-OVER-FIBER.....445
БОГАЧКОВ И.В.
Исследования характеристик рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в оптических волокнах, легированных ионами эрбия.....447
БОГАЧКОВ И.В.
Исследования характеристик рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в оптических волокнах, легированных ионами эрбия и церия.....449
БОГАЧКОВ И.В.
Исследования параметров рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в эрбиевых оптических волокнах с повышенным содержанием церия.....451
БОГАЧКОВ И.В.
Изучение характеристик спектра рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в оптических волокнах со смещённой длиной волны отсечки.....453

БОГАЧКОВ И.В.
Изучение параметров рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в оптических волокнах G.654 “Fujikura pure advance”.....455
ГАРМАЕВА Э.В.
Распределённые оптоволоконные датчики бриллюэновского рассеяния.....457
БОГАЧКОВ И.В.
Определение начальных значений бриллюэновского сдвига частоты в одномодовых оптических волокнах.....459
ПЧЕЛКИНА Н.В., РАБЕНАНДРАСАНА Ж., ЧИЖИН Д.Д.
Оценка влияния промышленных градирен на работу атмосферной оптической линии связи.....461
ПОЛЯКОВ А.В., ЮДЫЦКАЯ К.С.
Влияние межсимвольных помех на процесс динамического хранения информации в оптоволоконной буферной памяти.....463
БАХУС А.В., ЕРОХИН К.Ю., КАЗАНЦЕВ С.Ю.
Влияние фона на передачу квантового ключа в свободной атмосфере, реализованной на терминалах АОЛС М1-40GE.....465
МАРКВАРТ А.А., СЕДОВ Н.С., ЛИОКУМОВИЧ Л.Б., УШАКОВ Н.А.
Разрешающая способность оптоволоконного интерферометра Фабри-Перо с увеличенными коэффициентами отражения.....467
ЖУКОВСКИЙ Д.Д., КАЗАНЦЕВ С.Ю., ПЧЕЛКИНА Н.В.
Лабораторный стенд для исследования влияния контролируемых оптических возмущений на характеристики квантового канала связи в свободном пространстве.....469
ЭГАМОВ М.Х., МАХСУДОВ Б.И.
Эффект самофокусировки, индуцируемый маломощным лазером в жидких кристаллах с гибридной переориентацией.....471
ПЕРЕВОЩИКОВ Д.А., КАЛУГИН А.И., АНТОНОВ Е.А.
Зоны и оптические свойства кристаллов типа A^NB^{8-N}.....473
СУХАНОВ А.Е., ГАЛУЦКИЙ В.В.
Особенности модуляции сигнала в электрооптическом модуляторе на основе градиентного кристалла.....475
КОСТРИЦКИЙ С.М., ФЕДОРОВ В.А., СЕВОСТЬЯНОВ О.Г., ЧИРКОВА И.М.
Электрооптический эффект в канальных $Li_{1-x}H_xNbO_3$ волноводах.....477
САВЧЕНКОВ Е.Н., ДУБИКОВ А.В., ШАНДАРОВ С.М., БУРИМОВ Н.И., БЕЛЬСКАЯ Д.Е., ШУР В.Я., АХМАТХАНОВ А.Р., ЧУВАКОВА М.А.
Дифракция Брэгга эллиптического гауссова пучка на регулярной доменной структуре в кристалле ниобата лития.....479
КАДЕТОВА А.В., ТОККО О.В., ПРУССКИЙ А.И., ПАЛАТНИКОВ М.Н.
Влияние двойного легирования на структурные характеристики и концентрацию собственных дефектов в ниобате лития.....481
БОБРЕВА Л.А., СИДОРОВ Н.В., ПАЛАТНИКОВ М.Н., ПЯТЫШЕВ А.Ю.
Особенности дефектной структуры монокристаллов $LiNbO_3$:Tb.....483

КОЗЛОВ А.А., МОСКАЛЕВ Д.Н., ЖУРАВЛЕВ В.А., САЛГАЕВА У.О., КРИШТОП В.В., ВОЛЫНЦЕВ А.Б.
Профиль скорости ионного травления тонкоплёночного ниобата лития по глубине.....485
ТИТОВ Р.А., СМИРНОВ М.В., БОБРЕВА Л.А., ТЕПЛЯКОВА Н.А., СИДОРОВ Н.В., ПАЛАТНИКОВ М.Н.
Сравнительные исследования оптических свойств монокристаллов $LiNbO_3$:Zn:Mg, полученных по разным технологиям.....487
УМАРОВ М.Ф.
Анализ спектров фотолюминесценции для распознавания биоактивных препаратов.....489
НАБИЛКОВА А.О., ГУСЕЛЬНИКОВ М.С., ОПАРИН Е.Н., МЕЛЬНИК М.В., ЦЫПКИН А.Н., КОЗЛОВ С.А.
Исследование бистабильности пропускания высокоинтенсивного терагерцового излучения нелинейным «беззеркальным» интерферометром Фабри–Перо на основе $LiNbO_3$.....491
СМИРНОВ М.В., СИДОРОВ Н.В., ПАЛАТНИКОВ М.Н., ЩЕРБИНА О.Б., ПИКУЛЕВ В.Б.
Проявление фотоиндуцированных эффектов в спектрах фотолюминесценции кристалла и керамики ниобата лития.....493
ТОККО О.В., КАДЕТОВА А.В., ПЕТРОВА С.В., ПАЛАТНИКОВ М.Н., ТЕПЛЯКОВА Н.А.
Дефектная структура и оптические характеристики кристаллов ниобата лития, легированного церием.....495
НАБИЛКОВА А.О., МЕЛЬНИК М.В., ИСМАГИЛОВ А.О., АРЦЕР И.Р., ЦЫПКИН А.Н., КОЗЛОВ С.А.
Модифицированный метод Z-сканирования для исследования гигантских нелинейностей в терагерцовом диапазоне частот.....497
УМАРОВ М.Ф.
Особенности изочастных спектров комбинационного рассеяния света кристаллов ниобата бария стронция.....499
ПИКУЛЬ О.Ю., СИДОРОВ Н.В., ТЕПЛЯКОВА Н.А., ПАЛАТНИКОВ М.Н.
Исследование кристалла KTP методами лазерной коноскопии и фотоиндуцированного рассеяния света.....501
ДЮ В.Г., КИСТЕНЕВА М.Г., ШАНДАРОВ С.М., ЦЫКАЛОВА А.В., МУРАШКИН В.В., КАРГИН Ю.Ф.
Спектральные зависимости фотоиндуцированного поглощения в кристалле $Bi_{12}TiO_{20}$:Zn,P.....503
ДАВЫДОВСКАЯ В.В., ФЕДОРОВА А.В.
Осуществление перекачки энергии между синфазными пучками в фоторефрактивном кристалле SbN.....505

МАРИНИЧЕВА К.А., ИВАНОВА А.И., КАПЛУНОВ И.А., ЕГОРОВА К.А., ТРЕТЬЯКОВ С.А., ИВАНОВ А.М., РАКУНОВ П.А.
Влияние магнитного поля на оптические свойства полупроводниковых кристаллов.....507
КУЗЬМИН Н.Н., БОЛДЫРЕВ К.Н., МАЛЬЦЕВ В.В., МИКЛЯЕВА Е.П.
Синтез, оптические и магнитные свойства двойного бората $HoCr_3(BO_3)_4$.....509
СУББОТИН К.А., ЗИМИНА Ю.И., ДИДЕНКО Я.С., ТИТОВ А.И., ИСХАКОВА Л.И., ЛИС Д.А., ПАВЛОВ С.К., КУЛЕШОВА К.В., ЛОЙКО П.А., ЭЛАБЕДИН Г.З., НАДИ А., КАМИ П., БРАУД А., СОЛЕ Р.М., АГУИЛО М., ДИАС Ф., МАТЕОС Х.
Рост, структура и спектроскопия лазерного кристалла $MgMoO_4$, легированного ионами Yb^{3+}.....511
СЕМЕНОВА Л.Е.
Теоретическое исследование резонансного рассеяния при двухфотонном возбуждении в кристалле CdS.....513
МОЛЧАНОВА А.Д., ДИАБ М.О., БОЛДЫРЕВ К.Н., ПОПОВА М.Н.
Люминесцентная спектроскопия кристалла $YAl_3(BO_3)_4$:Cr.....515
ЗИМИНА Ю.И., СУББОТИН К.А., ТИТОВ А.И., ЛИС Д.А., ДИДЕНКО Я.С., КУЛЕШОВА К.В., ЛОЙКО П.А., ЭЛАБЕДИН Г.З., ЧЖУНБЭНЬ П., НАДИ А., КАМИ П., БРАУД А., СОЛЕ Р.М., АГУИЛО М., ДИАС Ф., ЧЭНЬ В., МАТЕОС Х., ПЕТРОВ В.
Исследования нового лазерного кристалла $ZnWO_4$, легированного ионами Tm^{3+}.....517
ПАВЛОВ В.И.
В поисках оптимальной температурной точки горячего микрорезонатора из фторида магния.....519
ГАТАТДИНОВ А.Р., УШАКОВ Ф.А. ПАВЛОВ В.И.
Сравнение методов оценки нагрева микрорезонатора из фторида магния при поглощении оптической мощности накачки.....521
СЕКТАРОВ Э.С., ХОМИЧ А.А., БОЛЬШАКОВ А.П., СЕДОВ В.С., РАЛЬЧЕНКО В.Г., БОЛДЫРЕВ К.Н.
Влияние отжига на центры окраски в алмазе.....523
МЕДНИКОВ С.В., ЖУКОВ С.С.
Сольватохромный эффект в окрестности сегнетоэлектрического фазового перехода в сегнетоэлектрике ТГС.....525
КОРНИЛИЦЫН А.Р., КУНЕВА М., МОЛОЛКИН А.А., СОСУНОВ А.В.
Оптические волноводы в смешанных сегнетоэлектрических монокристаллах.....527
БЕЗУС Ю.А., РЫБАЛКА А.Е., РУМЯНЦЕВ В.В., ФЕДОРОВ С.А.
Распространение света в несовершенной сверхрешётке Si-ЖК.....529
ХАЛЯПИН В.А., БУГАЙ А.Н.
Режимы распространения филаментов в воздухе.....531

ПЕТРОВ Н.И.
Фокусировка частично-когерентных бессель-коррелированных пучков света градиентной линзой.....533
МАКСИМОВ Д.В., БОГУСЛАВСКАЯ-ГАПЕШИНА А.А., ЯКУБОВ С.И., ХАЛИЛОВ С.И., БРЕЦЬКО М.В.
Преобразование ОУМ астигматических структурированных пучков Лагерра–Гаусса.....535
БОГУСЛАВСКАЯ-ГАПЕШИНА А.А., МАКСИМОВ Д.В., ЯКУБОВ С.И., ХАЛИЛОВ С.И., БРЕЦЬКО М.В.
Поляризационная структура векторных структурированных пучков Лагерра–Гаусса.....537
ПЕТРОВ Н.И., СОКОЛОВ Ю.М., СТОЯКИН В.В., ДАНИЛОВ В.А., ПОПОВ В.В.
Угловой сдвиг Имберта–Федорова при плазмонном резонансе в субволновых дифракционных решётках.....539
БАРАНОВ К.Н., ГОРЛАЧ М.А.
Бианизотропный отклик многослойной структуры с вращающейся от слоя к слою осью анизотропии.....541
ТЮТЬКОВ В.С., ВАШУКЕВИЧ Е.А.
Формирование перепутывания в гибридных атомно-полевых высокоразмерных системах для квантовых вычислений в дискретных переменных.....543
ДЗЕДОЛИК И.В.
Плазмонные логические элементы на основе углеродных нанотрубок.....545
СИНГХ Р., ТЕРЕТЁНКОВ А.Е.
Квантовая чувствительность сжатого состояния кота Шредингера.....547
КУЗНЕЦОВА К.Р., БАЕВА А.В., ВАШУКЕВИЧ Е.А.
Алгоритм Гровера: реализация на классической и квантовой системах.....549
ЯКУШЕНКОВ П.О.
Самофокусировка излучения как коллапс волнового вектора.....551
ПОЛЕТАЕВ Д.А., СОКОЛЕНКО Б.В.
Особенности применения оптических вихрей для снижения трения газа о стенки газопроводов.....553
ДЕНИСОВ Д.Г.
Анализ и исследование когерентных свойств и эллипсометрических характеристик рассеянного лазерного излучения от шероховатых оптических поверхностей.....555
ТЕРЛО Я.В., ВОЗНЕСЕНСКАЯ А.О.
Использование метода геометрического отображения лучей для конструирования систем неизображающей и изображающей оптики.....557
БУДНЕВ А.Ю., ПРОСОВСКИЙ О.Ф., ИСАМОВ А.Н., ПРОСОВСКИЙ Ю.О., СМОЛЬЯНИНОВ В.А.
Факторы, влияющие на пятно луча при управлении развёрткой электронно-лучевой пушки.....559

КУЗЬМИН М.С., РОГОВ С.А.
Увеличение динамического диапазона оптического спектроанализатора при дискретном вводе сигналов.....561
ЛАВРОВ А.П., ИВАНОВ С.И.
Акустооптоэлектронный процессор ЛЧМ-радиосигналов большой длительности с согласованной фильтрацией по скользящим сегментам сигнала.....563
БУСУРИН В.И., КОРОБКОВ К.А., ЗО Л.Х.
Анализ погрешности нелинейности узла считывания перемещений балочного чувствительного элемента микрооптоэлектромеханического преобразователя линейного ускорения.....565
ЦАРЕВА А.М., ШАКИРОВ Н.И., ИВАНОВА А.А., ЭРГАШЕВА О.В., МАКАЕВА Р.Х.
Использование результатов голографических испытаний круглых пластин при анализе резонансных колебаний рабочих колёс изделий машиностроения.....567
САГАТЕЛЯН Г.Р., ПИСКУНОВА Е.Р., КУЗНЕЦОВ А.С., СОЛОМАШЕНКО А.Б.
Технологическое обеспечение геометрических характеристик прецизионных оптических деталей методами абразивной доводки.....569
ПАВЛЕНКО Д.В., ПЕТРОВА Е.К., СТАРИКОВ Р.С.
Управление формой корреляционного максимума для фильтров с минимальной средней энергией корреляции.....571
БАТАШОВА С.С., ЗОЛОТУХИНА А.А., ГУРЫЛЕВА А.В., МАЧИХИН А.С.
Корреляция спектрофотометрических, гиперспектральных и флуометрических измерений содержания хлорофилла в листьях растений.....573
ЕГОРЧЕНКОВ Н.А., ПАВЛОВ И.Н., РАСКОВСКАЯ И.Л.
Построение физической модели диффузионного слоя в прозрачных жидкостях.....575
ЧЕРЕШНЕВ В.О., ПРОСКУРИН С.Г.
Формирование ОКТ-изображений в зависимости от вклада фотонов с различными кратностями рассеяния.....577
ВОЛКОВ В.Г., ГИНДИН П.Д., КАРПОВ В.В., КУЗНЕЦОВ С.А.
Многоканальный комплекс наблюдения.....579
КОРОБКОВ М.А., ЗАЙКИН В.Д., ДЕМИДОВ А.С., ХОМУТСКАЯ О.В.
Разработка оптической системы для установки прямого экспонирования на основе жидкокристаллической матрицы.....581
КРУГЛОВ С.К., ЛУПИН А.В.
Динамическое управление режимами работы матричной видеокамеры на основе «системы на кристалле» 583
ВОЛКОВ В.Г., ГИНДИН П.Д., КАРПОВ В.В., КУЗНЕЦОВ С.А.
Трёхканальный импульсный лазерный осветитель.....585

БАЛАН Н.Н., ВАСИН А.А., ИВАНОВ В.В., ПАНКРАТОВ А.Л.
Практическая оценка составляющих дозовой ошибки в проекционной фотолитографии.....587
КОТЛИКОВ Е.Н., ЛАВРОВСКАЯ Н.П., ТЕРЕЩЕНКО Г.В.
Интерференционный фильтр для датчиков открытого пламени с компенсацией паразитных засветок.....589
БРАЖНИКОВ М.К., ХАТЫРЕВ Н.П.
Измерения давления и плотности газов методами оптических частотных измерений.....591
БУТЬ А.И., ЛЯЛИКОВ А.М.
Перспективность применения комбинированного интерференционно-теневого метода исследования дефектов лазерных сред и элементов оптики.....593
ТЮНИН А.Н., ЖМУРОВА Д.Б., ВАСЕЦКИЙ С.О., БЕЛЯКОВ В.В., ЖЕГЛОВ М.А., ШТЕК С.Г.
Разработка устройства определения расщепления частоты резонатора волнового твердотельного гироскопа с помощью интерферометра Майкельсона.....595
АВЛАСЕВИЧ Н.Т., ЛЯЛИКОВ А.М.
Влияние настройки опорных полос на величину остаточных аберраций в востановленных интерферограммах.....597
ЕМЕЛЬЯНОВ П.Н., ЗАБЕЛИН А.В., СОМОВ А.А., ТЕЛЕШЕВСКИЙ В.И.
Функция для моделирования интерферограммы белого света.....599
БЕЛАШОВ А.В., ЖИХОРЕВА А.А., БУТОРИН П.С., СЕМЕНОВ А.А., БЕЛЬТЮКОВА Д.М., СЕМЕНОВА И.В., ВАСЮТИНСКИЙ О.С.
Сравнительный анализ качества фазовой визуализации живых клеток с использованием источников излучения с высокой и низкой пространственной когерентностью.....601
МАКСИМОВА Л.А., РЯБУХО В.П.
Поперечная пространственная когерентность квазимонохроматического волнового поля с широким пространственным спектром: численное моделирование.....603
РАДНАТАРОВ Д.А., КОЗЬМИНА П.В., ГРОМОВ И.В., СЕРЕБРЕННИКОВ К.В., КОХАНОВСКИЙ А.Ю., КОБЦЕВ С.М.
Новый метод преобразования лазерных пучков.....605
НЕЖЕВЕНКО С.С., ЕЖОВА К.В.
Разработка метода анализа волнового фронта для оптических систем, содержащих изотропные среды, с учётом влияния поляризации падающего излучения.....607
ХАРИТОНОВ Д.Ю., КУЗНЕЦОВ А.А.
Программные инструменты для моделирования модулятора Маха–Цендера.....609
ДЬЯЧЕНКО А.А. , РЯБУХО В.П.
Формирование частотного спектра интерференционного поля слоистого микрообъекта в оптической микроскопии.....611

ЖИХОРЕВА А.А., БЕЛАШОВ М.В., БУТОРИН П.С., БЕЛАШОВ А.В., СЕМЕНОВА И.В., ВАСЮТИНСКИЙ О.С.
Исследование оптических свойств флуоресцентных микросфер, выполненных из полистирола, с помощью методов оптической спектроскопии и цифровой голографии.....613
ЕЗЕРСКИЙ А.С., ЧЕРНЫХ А.В., ПЕТРОВ Н.В.
Устранение кольцевых дефектов осевых голограмм, получаемых в цифровом голографическом микроскопе, основанном на линзе с эффектом геометрической фазы.....615
НАВНЫКО В.Н., БЛОЦКАЯ Д.С., КУЛАК Г.В., ШАНДАРОВ С.М.
Модуляция диэлектрической проницаемости кристалла InP: Fe при записи голограммы.....617
РАСТРЫГИН Д.С., ШАРАНГОВИЧ С.Н.
Мультиплексированные голографические ФПМ-ЖК дифракционные структуры с изменяющимся периодом.....619
КУЛАК Г.В., НАВНЫКО В.Н., НИКОЛАЕНКО Т.В.
Поляризационные особенности анизотропной брэгговской дифракции света на пропускающих голографических фазовых решётках.....621
КУЛАК Г.В., НАВНЫКО В.Н., НИКОЛАЕНКО Т.В.
Поляризационные особенности брэгговской дифракции света на отражательных голографических фазовых решётках.....623
ГАНЖЕРЛИ Н.М.
Влияние интерференции в тонких плёнках на дифракционную эффективность голограмм.....625
АВЛАСЕВИЧ Н.Т., ЛЯЛИКОВ А.М.
Восстановление интерференционной картины при использовании голограмм периодических структур, записанных в некогерентном свете.....627
ДОЛГИРЕВ В.О., ШАРАНГОВИЧ С.Н.
Преобразование поляризационных характеристик световых пучков электрически управляемыми мультиплексированными чирпированными ФПМ-ЖК дифракционными структурами.....629
ДЖАМАНКЫЗОВ Н.К., ИСМАНОВ Ю.Х.
Нагрев фототермических материалов в лазерном поле.....631
МОГИЛЬНЫЙ В.В., ХРАМЦОВ Э.А., ШКАДАРЕВИЧ А.П.
Голографическая запись в объёме полимера с боковыми антраценовыми группами.....633
ИСМАНОВ Ю.Х., ДЖАМАНКЫЗОВ Н.К., АЛЫМКУЛОВ С.А.
Некоторые особенности вращательного мультиплексирования голограмм....635
ШИШОВА М.В., СОЛОМАШЕНКО А.Б., АФАНАСЬЕВА О.Л., МАРКИН В.В., ЛУШНИКОВ Д.С.
Дисплей дополненной реальности на основе голограммных зеркал.....637
ТЫНЫШОВА Т.Д., ИСМАНОВ Ю.Х.
Информационное представление голографического процесса.....639

ПАВЛОВ А.В., СОЛОВЬЕВ Н.А.
Реализация некоммутативной логики методом голографии Фурье: численное исследование.....641
ЕФРЕМЦЕВ В.Г., ЕФРЕМЦЕВ Н.Г., ТЕТЕРИН П.Е., ТЕТЕРИН Е.П., БОНДАРЕНКО А.А., БАЗАВЛУК Е.С., МОРОЗИХИН А.Н., СКОРОБОГАЧ И.М.
Изменения показателей чувствительности и специфичности для классификации рака лёгких при изменении количества компьютерных томограмм из датасета LUNA16.....643
КИРИЙ С.А., РЫМОВ Д.А., РОДИН В.Г., ЧЕРЁМХИН П.А., СТАРИКОВ Р.С.
Реконструкция изображений с голограмм объёмных сцен методом генеративно-состязательной нейросети.....645
ДРОЗДОВ М.К., РЫМОВ Д.А., СВИСТУНОВ А.С., ШИФРИНА А.В., ЧЕРЁМХИН П.А., СТАРИКОВ Р.С.
Восстановление бинарных цифровых контейнеров данных с голограмм на основе свёрточной нейронной сети.....647
КУЗЬМИН Н.А., АРАПОВ Ю.Д.
Способ снижения шумовой составляющей на восстановленных цифровых голограммах с помощью нейронной сети.....649
ВОЛКОВ А.А., КАЗАКОВ Д.С., МЕЛЕШКО А.Д., МИНИХАНОВ Т.З., СВИСТУНОВ А.С., ШИФРИНА А.В., ПЕТРОВА Е.К., ЗЛОКАЗОВ Е.Ю.
Исследование динамики модуляции фазы жидкокристаллического пространственно-временного модулятора света.....651
НИКИТИН Н.В., КОЗЛОВ А.В., ЧЕРЁМХИН П.А., РОДИН В.Г.
Повышение качества изображений в фурье-птихографии с использованием компенсации темновых шумов цифровых камер.....653

Именной указатель авторов.....655

УДК 535(06)+004(06)

С.С. КОСОЛОБОВ, А.С. СМИРНОВ, А.К. ЗЕМЦОВА,
Д.С. ЗЕМЦОВ, А.И. ВЕРГУЛЕС, И.А. ПШЕНИЧНЮК,
Д.М. ЖИГУНОВ, К.Р. ТАЗИЕВ, К.Н. ГАРБУЗОВ, В.П. ДРАЧЕВ
Сколковский институт науки и технологий

ТЕХНОЛОГИИ КРЕМНИЕВОЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ФОТОНИКИ

Технологии кремниевой интегральной фотоники являются основой для создания целого класса устройств, таких как электрооптические модуляторы, фотодетекторы, оптические фильтры и переключатели, мультиплексоры и демультиплексоры, оптические трансиверы и другие. По многим параметрам кремниевая интегральная фотоника является достойным конкурентом альтернативных платформ, предлагающих устройства на основе фосфида индия, нитрида и оксида кремния и других материалов. В работе представлен обзор современных технологий кремниевой интегральной фотоники и разработанных на их основе компонентов фотонных интегральных схем и устройств.

S.S. KOSOLOBOV, A.S. SMIRNOV, A.K. ZEMTSOVA,
D.S. ZEMTSOV, A.I. VERGULES, I.A. PSHENICHNYUK,
D.M. ZHIGUNOV, K.R. TAZIEV, K.N. GARBUZOV, V.P. DRACHEV
Skolkovo Institute of Science and Technology

SILICON-BASED INTEGRATED PHOTONICS TECHNOLOGIES

Silicon-based integrated photonics technologies have become the base for the development of an entire class of devices, including optical modulators, photodetectors, optical filters and switches, (de)multiplexers, optical transceivers etc. In many respects, silicon photonic devices are worthy competitors of the alternative platforms on the base of indium phosphide, silicon nitride and silicon dioxide and other materials. Here we provide an overview of the modern technologies of silicon photonics and developed photonic integrated circuit components and devices.

Интегральная кремниевая фотоника на данный момент демонстрирует высокий конкурентный уровень среди технологических платформ, ориентированных на производство фотонных интегральных схем и устройств на их основе. За последние десятилетия интерес к исследованиям в области кремниевой фотоники неуклонно растёт и покрывает такие области применений, как телекоммуникации и

высокоскоростную передачу данных, радиофотонику, а также сенсоры, включающие фотодетекторы, лидары, гироскопы, биосенсоры, спектрометры и другие. Современный уровень технологий предоставляет огромные возможности для изготовления кремниевых фотонных интегральных схем, поскольку базируется на отработанных технологических процессах кремниевой микроэлектроники.

Основой для создания базовых компонент кремниевых фотонных интегральных схем является платформа кремний-на-изоляторе (КНИ), обладающая рядом преимуществ по сравнению с другими платформами, такими как нитрид и диоксид кремния, фосфид индия и другие. Одним из преимуществ является высокий оптический контраст материалов кремний-диэлектрик, обеспечивающий компактность изготавливаемых интегральных оптических элементов и возможность изготовления пластин КНИ с большим диаметром, значительно превышающим размеры пластин, достижимые на других альтернативных платформах. В дополнение к вышеперечисленным преимуществам, высокое качество кремния, характеризующееся низкими концентрациями примесей, а также хорошо отработанные технологии структурирования этого материала позволяют создавать элементы с минимальными шероховатостями стенок волноводов, что обеспечивает низкие оптические потери в сочетании с малыми размерами интегральных оптических компонентов. В данной работе проведены исследования и продемонстрированы результаты применения технологий кремниевой интегральной фотоники для создания компонентов фотонных интегральных схем и устройств [1 - 3].

Список литературы

1. Zemtsov D.S., et al. // J. Light. Technol. 2023, V. 41 (19). P. 6310.
2. Pshenichnyuk I.A., et al. // Phys. Rev. B. 2019. V. 100. P. 195434.
3. Zemtsov D.S., et al. // Opt. Lett. 2022. V. 47. P. 3339.

И.Б. БОБРОВ[1], Г.И. СТРУЧАЛИН[1], М.Ю. ГОЛОЩАПОВ[1,3], А. РОЗАНОВ[1], Д.А. КУЗЬМЕНОК[1], Е.В. ЛОМОВ[1], С.С. СТРАУПЕ[1,2]

[1]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
[2]Российский квантовый центр, Сколково
[3]Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный

ОДИНОЧНЫЕ АТОМЫ В ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ МАССИВАХ ОПТИЧЕСКИХ МИКРОЛОВУШЕК ДЛЯ ЗАДАЧ КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Одиночные атомы, захваченные в дипольные микроловушки или оптические пинцеты представляют собой одну из наиболее перспективных платформ для реализации квантовых вычислений. Мы обсудим принципы и методы формирования упорядоченных массивов одиночных атомов и достижимые параметры квантовых регистров на их основе. Отдельно остановимся на достигнутых в эксперименте точностях логических вентилей, физических ограничениях, связанных с различными механизмами декогеренции, и обсудим перспективы дальнейшего развития этой технологии.

I.B. BOBROV[1], G.I. STRUCHALIN[1], M.Yu. GOLOSHCHAPOV[1,3], A. ROZANOV[1], D.A. KUZMENOK[1], E.V. LOMOV[1], S.S STRAUPE[1,2]

[1]Lomonosov Moscow State University
[2]Russian Quantum Center, Skolkovo
[3]Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

SINGLE ATOMS IN HOLOGRAPHIC ARRAYS OF OPTICAL MICROTRAPS FOR QUANTUM COMPUTING

Single atoms trapped in dipole microtraps or optical tweezers are one of the most promising platforms for quantum computing. We will discuss the principles and methods for assembling the uniformly filled arrays of single atoms and the achievable parameters of atomic quantum registers. We will also discuss the state-of-the-art parameters of logical gate errors achieved in experiments and physical limitations caused by different decoherence mechanisms. Finally, prospects of further development of this technology will be outlined.

Среди различных физических реализаций квантовых компьютеров одиночные атомы в оптических ловушках в последние годы

демонстрируют, пожалуй, наиболее впечатляющий прогресс. В недавних работах в этой системе уже продемонстрирована возможность коррекции ошибок и манипуляций с логическими кубитами [1]. Основой квантового регистра являются одиночные атомы, в наших работах – ^{87}Rb, захватываемые в массивы жёстко сфокусированных оптических пинцетов [2]. Процесс захвата одиночных атомов из холодного газа в магнитооптической ловушке стохастический, однако разработаны методы сортировки и получения упорядоченных массивов из десятков и даже сотен атомов. На рис. 1 приведён пример фотографии такого упорядоченного массива, полученный в нашей лаборатории. В нашем случае кубиты кодируются в подуровни сверхтонкого расщепления основного состояния, что позволяет получать времена когерентности $T_2 \sim 1$ с и более. Адресные однокубитные операции осуществляются с помощью рамановского лазерного возбуждения сверхтонкого перехода и позволяют достигнуть точности более 0.99. Двухкубитные операции реализуются с помощью возбуждения атомов в ридберговские состояния (рис. 2) и использования эффекта ридберговской блокады для уменьшения чувствительности операций к флуктуациям положения атомов. В наших экспериментах в настоящий момент достигнута точность двухкубитных операций ~ 0.8, ограниченная остаточным тепловым движением атомов и фазовыми шумами лазеров ридберговского возбуждения.

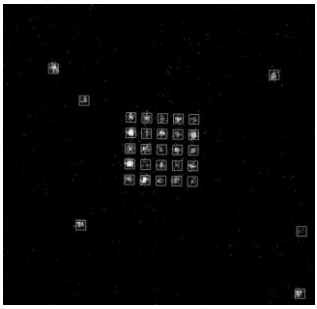


Рис. 1. Упорядоченный массив одиночных атомов ^{87}Rb, захваченных в массив оптических пинцетов

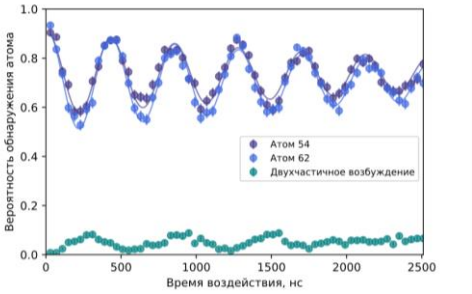


Рис. 2. Когерентное ридберговское возбуждение одиночных атомов в двух соседних узлах массива в условии ридберговской блокады

Список литературы

1. Bluvstein D., et al. // arXiv:2312.03982. 2023.
2. Morgado M., Whitlock S. // AVS Quantum Sci. 2021. V. 3. P. 023501.

И.А. ЛАРКИН, А.В. ВАГОВ[1,2], М.Д. КРОИТОРУ[2,3], В.М. АКСТ[1]
Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН, Черноголовка
[1]Байройтский университет, Германия
[2]Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва
[3]Федеральный университет Пернамбуку, Ресифи, Бразилия

СУПЕРАНОМАЛЬНЫЙ СКИН-ЭФФЕКТ И УСИЛЕННОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА ПРИ ОТРАЖЕНИИ ОТ ПРОВОДЯЩИХ СРЕД

В проводящих средах с большой длинной свободного пробега электронов возникают аномальные и супераномальные скин-эффекты. Аномальный скин-эффект связан с повышенным поглощением электромагнитного поля в радиочастотной области. В настоящей работе показано, что затухание Ландау, приводит к дополнительному пику поглощения в диапазоне оптических частот, связанному с супераномальным скин-эффектом.

I.A. LARKIN, A. VAGOV[1,2], M.D. CROITORU[2,3], V.M. AXT[1]
Institute of Microelectronics Technology and High-Purity Materials of the RAS, Chernogolovka
[1]University of Bayreuth, Germany
[2]National Research University Higher School of Economics, Moscow
[4]Federal University of Pernambuco, Recife, Brazil

SUPERANOMALOUS SKIN-EFFECT AND ENHANCED ABSORPTION OF LIGHT SCATTERED ON CONDUCTIVE MEDIA

In conducting media with a large electron mean free path, anomalous and superanomalous skin effects take place. The anomalous skin effect is associated with increased absorption of the electromagnetic field in the radio frequency range. This work shows that Landau damping leads to the appearance of an additional absorption peak in the optical frequency range, related to the superanomalous skin-effect.

Электроны в проводящих средах экранируют электромагнитное поле (скин-эффект), причём часть энергии поля поглощается в поверхностном слое. Обычно рассматриваются два типа скин-эффекта: нормальный (NSE) и аномальный (ASE). Недавно было показано [1, 2], что наблюдается и третий тип, названный супераномальным скин-эффектом

(SASE). Диэлектрический отклик металла хорошо описывается моделью слабо взаимодействующих частиц с квадратичной дисперсией и сферической поверхностью Ферми. Эта модель даёт поперечную и продольную компоненты диэлектрического тензора с пространственной дисперсией

$$\varepsilon^{tr}_{\omega k} = 1 - \frac{3}{2k^2}\frac{\Omega}{\omega}\left[1 - \frac{1}{2}\left(\frac{\Omega}{k} - \frac{k}{\Omega}\right)\ln\left(\frac{\Omega - k}{\Omega + k}\right)\right],$$
$$\varepsilon^{\ell}_{\omega k} = 1 + \frac{3}{k^2}\frac{\Omega}{\omega}\left[1 - \frac{\Omega}{2k}\ln\left(\frac{\Omega - k}{\Omega + k}\right)\right], \qquad \Omega = \omega + i\gamma \tag{1}$$

В пределе $k \to 0$ нелокальность отклика исчезает и обе компоненты тензора дают одно и то же выражение Друде $\varepsilon^{D}_{\omega} = 1 - 1/\Omega\omega$. Решение уравнений Максвелла для полупространства с откликом (1) позволяет найти коэффициент отражения R_p и вычислить поглощение a_p, которое имеет дополнительный пик (рис. 1) из-за супераномального скин-эффекта.

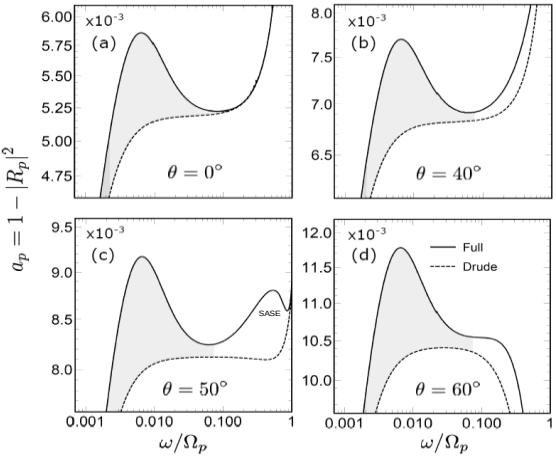


Рис. 1. Спектр способности поглощения a_p для p-поляризованных волн, рассчитанный для значений угла падения $\theta = 0$ ° (a), $\theta = 40$ ° (b), $\theta = 50$ ° (c), и $\theta = 60$ ° (d), результаты для модели (1) показаны сплошной линией, приближение Друде показано пунктирной линией, серая и светло-серая заливка представляют частотные диапазоны ASE и SASE

Список литературы

1. Larkin I. A., Keil K., Vagov A., Croitoru M. D., Axt V. M. Superanomalous skin effect for surface plasmon polaritons // Phys. Rev. Lett. 2017. V. 119. P. 176801.

2. Vagov A., Larkin I.A., Croitoru M.D., Axt V.M. Superanomalous skin-effect and enhanced absorption of light scattered on conductive media // Sci. Rep. 2023. V. 13. P. 5103.

УДК 535(06)+004(06)

В.Я. ШУР, А.Р. АХМАТХАНОВ, А.А. ЕСИН,
М.А. ЧУВАКОВА, А.А. БОЙКО[1]
Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина, Екатеринбург
[1]Новосибирский государственный университет

ПЕРИОДИЧЕСКИ ПОЛЯРИЗОВАННЫЕ КРИСТАЛЛЫ И ТОНКИЕ ПЛЁНКИ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЧАСТОТЫ СВЕТА

Представлены последние достижения в области создания прецизионных стабильных доменных структур в монокристаллах и тонких плёнках сегнетоэлектриков: ниобата лития, танталата лития и титанил-фосфата калия для генерации второй гармоники и параметрической генерации света. Приведены результаты по созданию доменных структур и волноводов в объёме кристаллов с помощью сфокусированного излучения фемтосекундного ИК-лазера.

V.Ya. SHUR, A.R. AKHMATKHANOV, A.A. ESIN,
M.A. CHUVAKOVA, A.A. BOYKO[1]
Ural Federal University, Yekaterinburg
[1]Novosibirsk State University

PERIODICALLY POLED FERROELECTRIC CRYSTALS AND THIN FILMS FOR LIGHT FREQUENCY CONVERTION

We will present the recent achievements in creation of the precise stable periodical domain structures in single crystals and thin films of lithium niobate, lithium tantalate and potassium titanyl phosphate for realization of the second harmonic generation and optical parametric oscillation. Moreover, the creation of regular domain structures and waveguides in the crystal bulk by focused irradiation of femtosecond IR laser will be demonstrated.

Сегнетоэлектрические кристаллы с прецизионными регулярными доменными структурами (РДС) с невоспроизводимостью периода не более 10 нм используются для нелинейно-оптических преобразований частоты лазерного излучения, включающих генерацию второй гармоники (ГВГ) и параметрическую генерацию света с рекордной эффективностью, за счёт реализации условия фазового квазисинхронизма [1]. Создание прецизионных РДС базируется на результатах детального исследования эволюции доменной структуры сегнетоэлектриков в неоднородном

электрическом поле и в пироэлектрическом поле, возникающем при быстром изменении температуры кристалла.

Исследовано формирование полосовых доменных структур в одноосных кристаллах при воздействии пространственно неоднородного электрического поля, создаваемого при помощи полосовых электродов, а также при сканировании сфокусированным электронным пучком. При нанесении диэлектрического слоя оксида кремния и модификации поверхностного слоя методом мягкого протонного обмена обнаружено формирование и анизотропный рост полосовых доменов субмикронной ширины при переключении в однородном поле.

Проведено детальное исследование эволюции доменной структуры и создание РДС в тонких монокристаллических плёнках ниобата лития на изолирующей подложке, изготовленных методом ионного скалывания (LNOI), которые являются перспективным материалом для создания устройств квантовой фотоники и нелинейной оптики [2]. Переключение поляризации локальным приложением напряжения с помощью проводящего зонда сканирующего зондового микроскопа позволило создать в LNOI стабильные субмикронные полосовые РДС с периодом менее 200 нм [3].

Создание веерных доменных структур в легированных MgO монокристаллах ниобата лития (MgO:LN) толщиной 1 мм обеспечило возможность в одном элементе получить ПГС с перестройкой холостой волны в широком спектральном диапазоне от 2,5 до 4,5 мкм при накачке лазером с длиной волны 1,053 мкм за счёт перемещения луча накачки.

Рассмотрены возможности локального переключения поляризации без приложения электрического поля с использованием только лазерного излучения (light-only switching) [4 - 6]. Продемонстрировано создание доменных структур и волноводов как на поверхности, так и в объёме кристаллов с помощью сфокусированного излучения фемтосекундного инфракрасного лазера. Представлен краткий обзор современного состояния этого нового перспективного направления доменной инженерии.

Список литературы

1. Shur V.Ya., Akhmatkhanov A.R., Baturin I.S. // Appl. Phys. Rev., 2015. V. 2. P. 040604.
2. Slautin B.N., Zhu H., Shur V.Ya. // Ceramics International. 2021. V. 47. P. 32900.
3. Slautin B.N., Zhu H., Shur V.Ya. // Ferroelectrics. 2021. V. 576. P. 119.
4. Lisjikh B., Kosobokov M., Turygin A., Efimov A., Shur V., Photonics, 2023. V. 10. P. 1211.
5. Shur V., Kosobokov M., Makaev A., Kuznetsov D. // J. Appl. Phys. 2023. V. 133. P. 014105.
6. Shur V., Kosobokov M., Makaev A., Kuznetsov D., Nebogatikov M., Chezganov D., Mingaliev E. // Acta Materialia. 2021. V. 219. P. 117270.

А.Н. ПУТИЛИН[1,3], А.Р. ГЕЙВАНДОВ[2], С.Е. ДУБЫНИН[1],
Н.А. ПУТИЛИН[1,3], И.В. СИМДЯНКИН[2], С.С. КОПЕНКИН[1,4]
[1]Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва
[2]Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова
ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва
[3]Московский государственный университет геодезии и картографии «МИИГАиК»
[4]МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

ПОЛЯРИЗАЦИОННОЕ РЕКОНФИГУРИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ДИСПЛЕЕВ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ

В данной работе представлено исследование возможностей применения поляризационных селективных холестерических жидкокристаллических линз для перестройки конфигурации работы оптических схем дисплеев дополненной реальности. Приводятся экспериментальные данные по записи и исследованию свойств таких линз для работы в диапазоне 635 - 640 нм.

A.N. PUTILIN[1,3], A.R. GEIVANDOV[2], S.E. DUBYNIN[1],
N.A. PUTILIN[1,3], I.V. SIMDYANKIN[2], S.S. KOPENKIN[1,4]
[1]Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow
[2]Shubnikov Institute of Crystallography of FSRC «Crystallography and Photonics» of the RAS, Moscow
[3]Moscow State University of Geodesy and Cartography "MIIGAiK"
[4]MIREA – Russian Technological University, Moscow

POLARIZATION RECONFIGURATION OF THE OPTICAL SYSTEM OF AUGMENTED REALITY DISPLAYS

This paper presents the study of the possibilities of using polarization selective cholesteric liquid crystal lenses to reconfigure the operation of optical designs for augmented reality displays. We discuss the experimental data on recording and measuring the properties of the lenses working in range of 635 - 640 nm.

Возможность перестройки оптических схем дисплеев дополненной (AR) и смешанной (MR) реальности является ключевым свойством при разработке устройств для массового применения [1], использование в этих случаях достаточно простых переключателей поляризации видится очень перспективным методом реконфигурирования схем AR-дисплеев.

Для записи внеосевых голографических линз с поляризационным переключением мы использовали фоточувствительный азокраситель Brilliant Yellow. Краситель наносили на стеклянную подложку на

центрифуге (2500 об/мин) из 1 % раствора диметилформамида. Затем фоточувствительный слой сушили 5 мин. при 120 °C и экспонировали двумя лучами (плоским и сферическим) с ортогональными циркулярными поляризациями (ЦП) излучением от DPSS-лазера мощностью 150 мВт с длиной волны 457 нм (рис. 1). Далее на записанную голограмму наносили жидкокристаллический материал RM257 ($\Delta n = 0.18$) с фотоинициатором Irgacure 651 (1.5 % от массы RM257) и правовращающей хиральной добавкой R5011 (1.72 % от массы RM257) из 25 % раствора в PGMEA. Слой RM257 полимеризовали светодиодной УФ-лампой (20 мВт/см^2 при $\lambda = 365$ нм) в атмосфере азота 4 мин. Таким образом, последовательно наносили три слоя для достижения целевой толщины ~ 1.6 мкм, средний период решёток был 1 мкм. Варианты конфигурации записывающих пучков позволяют записывать как BC для HUD (head up display – дисплей ветрового стекла), так и для HMD (head mounted display) – рис. 1. На рис. 2 показаны нулевой, +1 и –1 порядки дифракции на записанных голограммах при изменении направления вращения поляризации: сверху – левая ЦП фокусируется в –1 порядок, снизу – правая ЦП в +1 порядок.

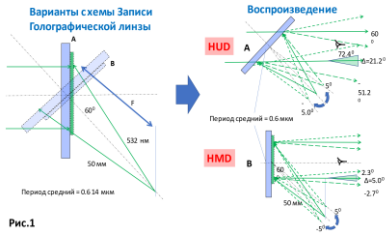


Рис. 1. Варианты конфигурации работы голографических совместителей пучков (beam-combiners) для HUD и HMD-дисплеев

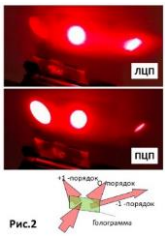


Рис. 2. Вид дифракции на холестерической жидкокристаллической линзе

Максимальная дифракционная эффективность достигала 88 % при угле падения воспроизводящего пучка 11 °, при этом соотношение эффективности в плюс и минус первом порядке достигало 400 : 1. При изменении поляризации соотношение эффективностей этих пучков менялось на обратное. Холестерические жидкокристаллические линзы в качестве устройств совмещения световых пучков могут одновременно выполнять несколько переключаемых функций, а поскольку они ещё и обладают высокой дифракционной эффективностью, то могут найти широкое применение в дисплеях дополненной и смешанной реальности.

Список литературы

1. Yang Q., Li Y., Ding Y., Wu S.-T. // ACS Applied Optical Materials. 23.02.2023.
2. Kress B.C. // Proc. SPIE. 2019. V. 11062. P. 110620J.

УДК 535(06)+004(06)

Е.П. БИТЯЕВ, Д.П. АГАПОВ, Д.Н. ФРОЛОВЦЕВ,
С.А. МАГНИЦКИЙ
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТА С ЛИНЕЙНОЙ ФАЗОВОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ МЕТОДОМ КВАНТОВОЙ ФАНТОМНОЙ ПОЛЯРИМЕТРИИ

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований, направленных на разработку принципов квантовой фантомной поляриметрии (КФП). В работе экспериментально показана возможность применения КФП к объектам с линейной амплитудной и фазовой анизотропией для восстановления их поляризационных свойства. Впервые получено фантомное изображение объекта с линейной фазовой анизотропией.

E.P. BITYAEV, D.M. AGAPOV, D.N. FROLOTSEV,
S.A. MAGNITSKIY

FORMING OF A POLARIZING IMAGE OF AN OBJECT WITH LINEAR PHASE ANISOTROPY BY QUANTUM GHOST POLARIMETRY

This paper presents the results of experimental studies aimed at developing the principles of quantum phantom polarimetry (QFP). The article experimentally shows the possibility of applying QFP to objects with linear amplitude and phase anisotropy to restore their polarization properties. For the first time, a phantom image of an object with linear phase anisotropy was obtained.

В настоящее время в оптике развивается новый способ получения изображения объекта при помощи метода фантомных изображений (ФИ) [1]. Метод ФИ основан на явлении интерференции интенсивностей. Одной из разновидностей метода ФИ является фантомная поляриметрия (ФП). Ранее в нашей научной группе было показано, что ФП может быть реализована как в классических световых полях [2], так и при использовании квантового света [3].

Принципиальная схема эксперимента показана на рис. 1. Лазерное излучение на длине волны 405 нм облучает нелинейный кристалл BBO, в котором на основе спонтанного параметрического рассеяния (СПР) генерируется два связанных фотона. Сигнальный фотон проходит через

полуволновую пластинку, объект, поляризатор, после чего детектируется счётчиком одиночных фотонов (ФД). Холостой фотон проходит через сканирующую диафрагму и также детектируется счётчиком. Время-цифровой преобразователь (ВЦП) позволяет измерить число совпадающих фотоотчётов.

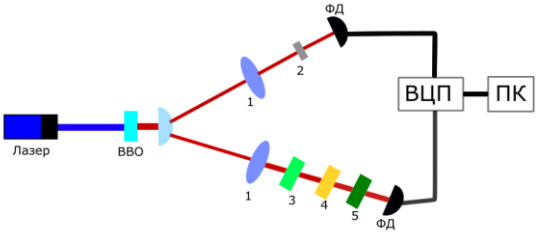


Рис. 1. Принципиальная схема эксперимента: 1 – собирающая линза, 2 – диафрагма, 3 – полуволновая пластинка, 4 – объект, 5 – поляризатор

Экспериментально было показано, что поляризационные свойства объекта могут быть восстановлены путём измерения числа совпадающих фотоотчётов в нескольких различных поляризационных базисах. Полученное изображение азимута анизотропии объекта приведено на рис. 2.

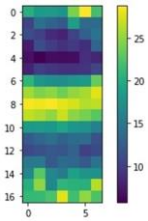


Рис. 2. Изображение азимута анизотропии объекта

Работа выполнена за счёт средств гранта Российского научного фонда (проект № 21-12-00155).

Список литературы

1. Strekalov D.V., et al. Observation of two photon "ghost" interference and diffraction // Phys. review letters. 1995. V. 74 (18). P. 3600-3603.

2. Chirkin A.S., Gostev P.P., Agapov D.P., Magnitskiy S.A. Ghost polarimetry: ghost imaging of polarization-sensitive objects // Laser Physics Letters. 2018. V. 15(11). P. 115404.

3. Magnitskiy S.A., Agapov D.P., Chirkin A.S. Quantum ghost polarimetry with entangled photons // Optics Letters. 2022. V. 47(4). P. 754-757.

УДК 535(06)+004(06)

И.Г. ДАДЕНКОВ, А.Л. ТОЛСТИК, Ю.И. МИКСЮК[1],
К.А. САЕЧНИКОВ[1]
Белорусский государственный университет, Минск
[1]Белорусский государственный педагогический университет, Минск

ИМПУЛЬСНАЯ ЗАПИСЬ ДИНАМИЧЕСКИХ ГОЛОГРАММ В КРИСТАЛЛЕ СИЛИКАТА ВИСМУТА ДЛЯ СИСТЕМ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Приведены результаты экспериментов по использованию кристалла силиката висмута в качестве фоточувствительной среды для записи голограмм в системах голографической интерферометрии. Проведена апробация схем для детектирования изменения температуры газов и сдвига объектов методом голографической интерферометрии.

I.G. DADENKOV, A.L. TOLSTIK, Yu.I. MIKSYUK[1],
K.A. SAECHNIKOV[1]
Belarusian State University, Minsk
[1]Belarusian State Pedagogical University, Minsk

PULSE RECORDING OF DYNAMIC HOLOGRAMS IN THE BISMUTH SILICATE CRYSTAL FOR HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY SYSTEMS

Presents the results of experiments on the use of a bismuth silicate crystal as a photosensitive medium for recording holograms in holographic interferometry systems. Installation and testing of circuits for detecting changes in the temperature of gases and the displacement of objects using the method of holographic interferometry was carried out.

Одной из особенностей фоторефрактивных кристаллов семейства силленитов является существование многочисленных примесных и дефектных центров, имеющих различную природу возникновения и активно участвующих в процессах перераспределения носителей заряда при фотовозбуждении. Особенностью кристаллов силленитов является одновременное существование как долгоживущих (секунды, часы), так и короткоживущих ловушек (микро- и миллисекунды) [1]. Данная особенность позволяет использовать кристаллы в системах записи, хранения и обработки оптической информации, голографических

интерферометрах и в качестве активных элементов адаптивных оптических систем [2].

Метод голографической интерферометрии основан на последовательной записи нескольких голограмм объекта в различные моменты времени и их одновременном считывании. В результате восстановленные волны интерферируют между собой и по характеру полученной интерференционной картины можно судить об изменениях контролируемых объектов. Поскольку голографическая интерферометрия может регистрировать состояние различных объектов в разные моменты времени, она может обнаруживать происходящие изменения в режиме реального времени. При этом существенные преимущества проявляются при использовании импульсной голографической записи, фиксирующей состояние объекта во временном промежутке, определяемом длительностью лазерных импульсов, как правило, порядка 10 нс.

Пример такой схемы экспериментальной установки для регистрации микросмещений объекта методом голографической интерферометрии представлен на рис. 1, где в качестве тестового элемента было использовано зеркало, закреплённое на динамике с частотой колебаний в несколько герц.

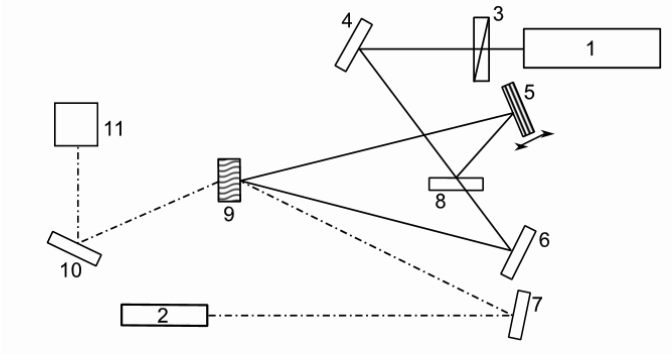


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – импульсный Nd:YAG лазер (532 нм), 2 – He-Ne лазер (632,8 нм), 3 – полуволновая пластинка, 4, 6, 7, 10 – глухое зеркало, 5 – колеблющееся зеркало, 8 – полупрозрачное зеркало, 9 – кристалл силиката висмута (BSO), 11 – ПЗС-камера.

Список литературы

1. Kornienko T., Kisteneva M., Shandarov S., Tolstik A. // Physics Procedia. 2015. V. 86. P. 105-112,

2. Ромашко Р.В. // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2021. Т. 4. С. 40-47.

УДК 535(06)+004(06)

Р.А. СИМОНЯН, С.С. ШМАКОВ, С.М. ШАНДАРОВ,
Н.И. БУРИМОВ
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИСТАЛЛА СИЛИКАТА ВИСМУТА СРЕЗА (111) МЕТОДОМ АДАПТИВНОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Приведены результаты экспериментов по измерению материальных параметров кристалла силиката висмута среза (111) методом адаптивной голографической интерферометрии при встречном взаимодействии фазово-модулированной и стационарной волн. Были определены коэффициенты фазовой демодуляции для среза (111) и для среза ($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$).

R.A. SIMONYAN, S.S. SHMAKOV, S.M. SHANDAROV,
N.I. BURIMOV[1]
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

STUDY OF CUT (111) BISMUTH SILICATE CRYSTAL BY ADAPTIVE HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY

The results of experiments on measuring the material parameters of a cut bismuth silicate crystal (111) using the method of adaptive holographic interferometry with counter-propagating interaction of phase-modulated and stationary waves are presented. The phase demodulation coefficients for cutoff (111) and cutoff ($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$) were determined.

Целью работы является экспериментальное исследование кристалла силиката висмута среза (111) методом адаптивной голографической интерферометрии, рассчитать материальные параметры материальные параметры кристаллов титаната и силиката висмута среза (111). А также провести экспериментальное исследование для среза ($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$), путём изменения входной грани кристалла.

В данной работе использовалась установка, которая применялась в такой работе [1]. Полученные экспериментальные данные обрабатывались в программе [2], которая проводила аппроксимацию и анализ экспериментальных данных сигнала фазовой демодуляции адаптивного голографического интерферометра на основе встречного взаимодействия в кристаллах.

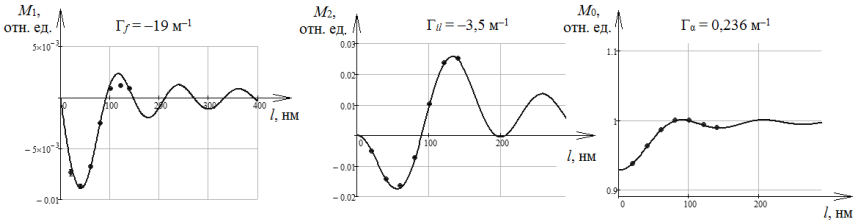


Рис. 1. Коэффициенты сигнала фазовой демодуляции для среза (111)

В ходе обработки экспериментальных данных, нами получены такие результаты коэффициентов фазовой демодуляции (рис. 1) $\Gamma_\alpha = 0{,}236$ м$^{-1}$, характеризующий вклад абсорбционной составляющей голограммы в фоторефрактивный отклик, $\Gamma_f = -19$ м$^{-1}$, вклад обратного флексоэлектрического эффекта, и $\Gamma_{il} = -3{,}5$ м$^{-1}$, вклад линейного электрооптического эффекта. Данные были получены для стороны среза (111). При изменении входной грани кристалла силиката висмута, при этом, не изменяя поляризации световых пучков, на сторону среза ($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$), были получены такие коэффициенты сигнала фазовой демодуляции $\Gamma_\alpha = 0{,}236$ м$^{-1}$, $\Gamma_f = 2{,}5$ м$^{-1}$ и $\Gamma_{il} = 3{,}5$ м$^{-1}$, графики амплитуд представлены на рис. 2.

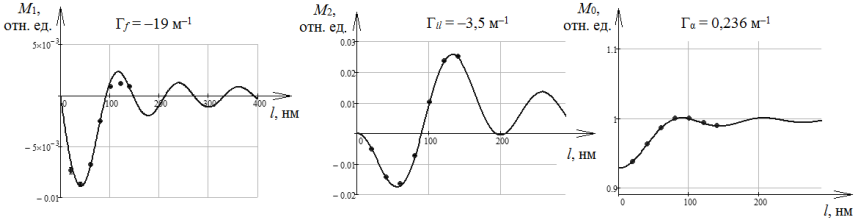


Рис. 2. Коэффициенты сигнала фазовой демодуляции для среза ($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$)

Список литературы

1. Моргунов Ф.Р., Мостепан П.В., Симонян Р.А. и др. Встречное взаимодействие световых пучков в кристалле титаната висмута среза (111) // Материалы международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР 2023», Томск: ТУСУР, 2023. Ч. 1. С. 222-225.

2. Шмаков С.С., Симонян Р.А., Костеников М.А. и др. Нейронная сеть для анализа сигнала фазовой демодуляции адаптивного голографического интерферометра // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022668192, заявка № 2022666990 от 19.092022, зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 04.102022.

УДК 535(06)+004(06)

Е.П. ПОЖИДАЕВ, А.В. КУЗНЕЦОВ,
А.А. ЖУКОВИЧ-ГОРДЕЕВА, С.И. ТОРГОВА
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ФЕРРИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И АНТИСЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ФАЗАХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ

Экспериментально показано, что геликоидальные ферриэлектрическая и антисегнетоэлектрическая фазы жидких кристаллов с шагом спирали $p_0 < 100$ нм существуют в широких температурных интервалах (включающих комнатные температуры) в смесях, содержащих смектические С бифенилпиримидины и хиральную добавку (S, S)-1,1,1-трифтороктан-2-ил 2-гидроксипропаноат. Найдены условия и особенности безгистерезисного отклика электрооптических ячеек на основе ферриэлектрических и антисегнетоэлектрических жидких кристаллов.

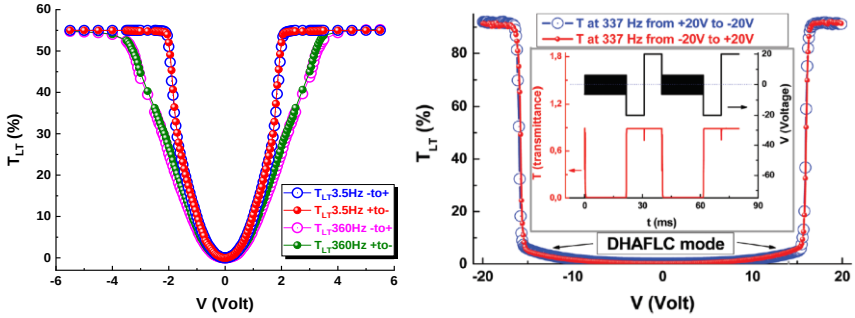
E.P. POZHIDAEV, A.V. KUZNETSOV,
A.A. ZHUKOVICH-GORDEEVA, S.I. TORGOVA
Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

ELECTRO-OPTICAL EFFECTS IN FERRIELECTRIC AND ANTIFERROELECTRIC PHASES OF LIQUID CRYSTALS

It has been experimentally shown that helical ferrielectric and antiferroelectric phases of liquid crystals with the helix pitch $p_0 < 100$ nm exist in wide temperature ranges (including room temperatures) in mixtures containing achiral biphenylpyrimidines and the non-mesogenic chiral dopant (S, S)-1,1,1-trifluorooctane-2-yl 2-hydroxypropanoate. The conditions and features of the hysteresis-free response of electro-optical cells based on ferrielectric and antiferroelectric liquid crystals are found.

В геликоидальных жидкокристаллических ферриэлектриках (ЖКФ) и антисегнетоэлектриках (АСЖК) с субволновым шагом спирали наблюдается электрооптический эффект деформированного электрическим полем геликоида, известный как deformed helix ferroelectric (DHF) эффект [1, 2]. В ферриэлектриках этот эффект позволяет осуществлять беспороговую, непрерывную и безгистерезисную электрооптическую модуляцию (рис. 1*а*), а в антисегнетоэлектриках наблюдается явно выраженный порог электрооптического переключения

(рис. 1*б*), в чём состоит существенное различие между этими электрооптическими средами.



а *б*

Рис. 1. Безгистерезисные зависимости светопропускания T_{LT} электрооптических ячеек: на основе жидкокристаллического ферриэлектрика FerriLCM-1 [2], толщина слоя которого 2.3 мкм (*а*); на основе жидкокристаллического антисегнетоэлектрика AFLC-036 [1], толщина слоя которого 1.5 мкм (*б*), на вставках показаны: частоты знакопеременного электрического напряжения, приложенного к ячейке (*а*), сверху – частота приложенного напряжения, на вставке в центре, вверху форма приложенного напряжения, внизу форма электрооптического отклика (*б*)

Электрическое поле, при приложении которого достигается насыщение светопропускания, для ферриэлектрического (ФЖК) примерно на порядок ниже, чем для антисегнетоэлектрического (рис. 1), что позволяет рассматривать ФЖК как самые низковольтные на сегодняшний день электрооптические среды фотонных устройств. Кроме того, быстродействие ФЖК на порядок выше такового у коммерчески доступных нематических жидких кристаллов (НЖК), используемых в современных дисплеях и фазовых матрицах.

Достоинством АСЖК является возможность использования для их электронного управления тех же самых драйверов, что и для управления НЖК в современных дисплеях, как показано на вставке к рис. 1*б*. Вместе с тем, быстродействие АСЖК на один-два порядка выше, чем НЖК.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 24-22-00239.

Список литературы

1. Pozhidaev E.P., et al. // J. Mater. Chem. C. 2016. V. 4 . P. 10339.
2. Pozhidaev E.P., et al. // Optics Letters. 2022. V. 47 (12). P. 1598.

УДК 535(06)+004(06)

П.В. ДОЛГАНОВ, К.Д. БАКЛАНОВА, В.К. ДОЛГАНОВ
Институт физики твердого тела РАН им. Ю.А. Осипьяна РАН, Черноголовка

ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ФОТОННЫЕ СТРУКТУРЫ С МНОГОУРОВНЕВЫМ УПОРЯДОЧЕНИЕМ

Приготовлены жидкокристаллические фотонные структуры с многоуровневым упорядочением на основе хиральных холестерических жидких кристаллов. Структуры получены при температуре, близкой к температуре перехода в изотропную жидкость, могут быть охлаждены вплоть до комнатной температуры и сохраняют свою структуру при длительном хранении. Полученные фотонные структуры обладают уникальными оптическими и спектральными характеристиками.

P.V. DOLGANOV, K.D. BAKLANOVA, V.K. DOLGANOV
Osipyan Institute of Solid State Physics of the RAS, Chernogolovka

LIQUID-CRYSTALLINE PHOTONIC STRUCTURES WITH MULTILEVEL ORDERING

Liquid-crystalline photonic structures with multilevel ordering on the basis of chiral cholesteric liquid crystals have been obtained. The structures were obtained at temperatures close to the transition to the isotropic liquid, they can be cooled down to room temperature and retain their structure during prolonged storage. The obtained photonic structures possess unique optical and spectral characteristics.

Нами разработан метод приготовления на основе холестерических жидких кристаллов фотонных структур с многоуровневым упорядочением на масштабах, существенно превышающих период холестерика [1, 2]. Холестерический жидкий кристалл вблизи температуры плавления образует так называемые Голубые фазы с трёхмерным кубическим упорядочением. Они образуются при шаге спирали холестерика меньше 0.3 мкм. При большом шаге спирали (более 1 мкм) образуется одномерная модулированная структура. Мы провели детальные исследования в промежуточном диапазоне значений шага спирали и обнаружили формирование многоуровневых структур, образующих так называемые циклиды Дюпена, периодически изменяющие свою ориентацию по отношению к плоскости фотонного кристалла. Период структуры с квадратным упорядочением в плоскости образца (рис. 1) может составлять от 10 мкм до порядка 40 мкм. При этом шаг холестерической спирали, из

которой образована структура, более чем на порядок меньше. Это приводит к уникальному виду структур в проходящем и отражённом свете, зависимости оптических свойств от поляризации световой волны (линейной, круговой), нетривиальным спектральным характеристикам. Положение фотонной зоны можно перестраивать в широких пределах, изменяя как хиральность материала, так и температуру.

В работе изучено взаимодействие света с периодической структурой, исследуются поляризационные характеристики проходящего (рис. 2) и отражённого света. Показано, что вращение плоскости поляризации и селективное отражение света вносят существенный вклад в оптические характеристики. На основе проведённых исследований предложена модель структуры, включающая в себя конфокальные домены. Выяснена роль поверхности и ориентации молекул жидкого кристалла, одномерной спирали на поверхности в образовании двумерных структур.

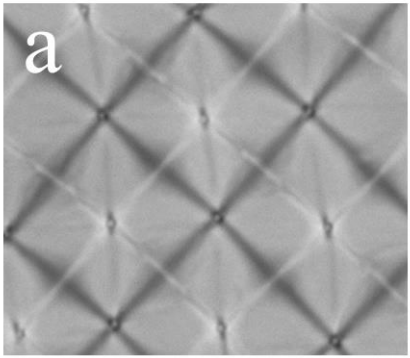


Рис. 1. Вид двумерного фотонного кристалла в проходящем свете

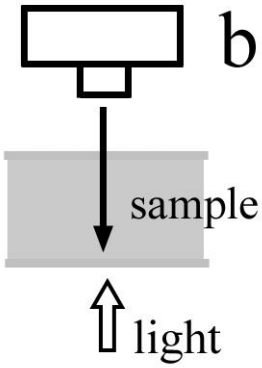


Рис. 2. Схема наблюдения фотонного кристалла в проходящем свете

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант 23-12-00200.

Список литературы

1. Dolganov P.V., Baklanova K.D., Dolganov V.K. // Phys. Rev. E. 2022. V. 106. P. 014703.
2. Baklanova K.D., Dolganov P.V., Kats E.I., Dolganov V.K. // JETP Lett. 2023. V. 117. P. 534.

УДК 535(06)+004(06)

В.Б. НОВИКОВ, А.К. ЗАГРАВСКИЙ, С.В. СОТНИЧУК,
Н.К. ДАВИДЕНКО, А.Ю. БОБРОВСКИЙ, Т.В. МУРЗИНА
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ГИГАНТСКИЙ ЭФФЕКТ ТЕРМИЧЕСКОЙ МОДУЛЯЦИИ ОПТИЧЕСКОГО ПРОПУСКАНИЯ В СТРУКТУРАХ ENZ-МЕТАМАТЕРИАЛ / ЖИДКИЙ КРИСТАЛЛ

Экспериментально и теоретически исследовано термическое управление прохождением света через массив золотых наностержней в диэлектрической матрице. Свободно стоящие сегменты наностержней, выступающие из матрицы, были окружены нематическими жидкими кристаллами (ЖК). Такой метаматериал демонстрирует ENZ-режим, при котором одна из компонент тензора эффективной диэлектрической проницаемости принимает близкие к нулю значения. Обнаружено резонансное изменение коэффициента прохождения света через структуру в спектральной окрестности ENZ-режима при изменении её температуры. Показано, что высокая чувствительность оптических свойств метаматериала вызвана нелокальностью его оптического отклика и высоким температурным коэффициентом показателя преломления ЖК.

V.B. NOVIKOV, A.K. ZAGRAVSKII, S.V. SOTNICHUK,
N.K. DAVIDENKO, A.Yu. BOBROVSKY, T.V. MURZINA
Lomonosov Moscow State University

GIANT EFFECT OF THERMAL MODULATION OF OPTICAL TRANSMISSION IN ENZ-METAMATERIAL / LIQUID CRYSTAL STRUCTURES

The thermal control of light transmission through an array of gold nanorods in a dielectric matrix has been investigated experimentally and theoretically. Free-standing segments of the nanorods protruding from the matrix were surrounded by nematic liquid crystals (LCs). Considered metamaterial exhibits the ENZ regime in which one of the components of the effective dielectric constant tensor takes near-zero values. A resonant change of the light transmission of the structure in the spectral vicinity of the ENZ regime at the temperature change was revealed. It is shown that the high sensitivity of the optical properties of the metamaterial is caused by the nonlocality of its optical response and the high temperature coefficient of the LC refractive index.

Усиление оптических эффектов в композитных структурах на основе массивов плазмонных наностержней, расположенных в диэлектрической матрице, вызывает особый интерес в фотонике для управления световым

излучением [1]. Такие сильно анизотропные структуры проявляют близкое к нулю значение необыкновенной компоненты ε_e тензора эффективной диэлектрической проницаемости – ENZ-режим [2]. Эта ключевая особенность нашла применение для усиления нелинейно- и магнитооптических эффектов. Вместе с тем малые значения ε_e делают существенными эффекты оптической нелокальности в таких метаматериалах, давая возможность получать с их помощью, например, пространственно-временные вихревые лазерные импульсы. Важно, что спектральное положение ENZ-режима определяется диэлектрической проницаемостью материалов и их объёмной долей в структуре, позволяя задавать его дизайном метаматериала.

В работе исследуется прохождение света через ENZ-метаматериал, состоящий из массива золотых наностержней диаметром 30 - 35 нм и длиной 650 нм, выращенных в матрице анодного оксида алюминия. Сегменты наностержней длиной 100 нм выступали за пределы матрицы и были окружены нематическими жидкими кристаллами (ЖК) 5CB, нанесёнными центрифугированием. В нематической фазе эти ЖК имеют высокую одноосную анизотропию ($\Delta n \approx 0.18$), а при нагреве выше температуры фазового перехода (35 °C) находятся в изотропной фазе.

Рассматриваемый метаматериал демонстрирует ENZ-режим в спектральной окрестности длины волны света $\lambda_{ENZ} = 680$ нм, проявляющийся минимумом в спектре пропускания структуры при наклонном падении p-поляризованного излучения. Обнаружено, резонансное изменение коэффициента пропускания метаматериала в спектральной окрестности λ_{ENZ} при нагреве структуры в диапазоне температур нематической фазы ЖК. Нагрев структуры с 25 до 33 °C значительно, до 3 раз, увеличивает пропускание.

Анализ показывает, что наблюдаемый эффект связан во-первых с уменьшением необыкновенного показателя преломления ЖК при нагреве и также с наличием дополнительных локальных минимумов в частотно-угловой зависимости пропускания ENZ-структуры. Последние вызваны нелокальностью оптического отклика метаматериала и межмодовой деструктивной интерференцией света в структуре, условия которой оказываются зависящими от температуры ЖК.

Работа поддержана Российским научным фондом, грант 19-73-10176.

Список литературы

1. Poddubny A., et al. // Nature photonics. 2013. V. 7. P. 948-957.
2. Starko-Bowes R., et al. // JOSA B. 2015. V. 32. P. 2074-2080.

УДК 535(06)+004(06)

Д.Ю. ДЕМУШКИН[1], Д.А. ДЕНИСОВ[1], И.В. ГРИЩЕНКО[2],
Н.А. ХОХЛОВ[3], А.В. КОНЯШКИН[2], О.А. РЯБУШКИН[1,2]
[1]Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный
[2]Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
[3]Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ ЛИТИЙ-НАТРИЕВОГО МОЛИБДАТА

Представлены результаты измерений коэффициента оптического поглощения лазерного излучения на длине волны 1064 нм в нелинейно-оптическом кристалле литий-натриевого молибдата.

D.Yu. DEMUSHKIN[1], D.A. DENISOV[1], I.V. GRISHCHENKO[2],
N.A. KHOKHLOV[3], A.V. KONYASHKIN[2], O.A. RYABUSHKIN[1,2]
[1]Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny
[1]Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS
[3]Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow

MEASUREMENT OF OPTICAL ABSORPTION COEFFICIENT OF LITHIUM-SODIUM MOLYBDATE CRYSTALS

We introduce the measurement results of the optical absorption coefficient of the lithium-sodium molybdate nonlinear-optical crystals at 1064 nm wavelength.

Представитель группы молибдатов $LiNa_5Mo_9O_{30}$ (LNM), который впервые был синтезирован в 2012 году [1], является одним из перспективных кристаллов для осуществления нелинейно-оптического преобразования частоты лазерного излучения. Данный кристалл может быть использован для параметрического преобразования и генерации гармоник среднего инфракрасного излучения, так как имеет широкий диапазон прозрачности 0.357 - 5.260 мкм [2].

Данная работа посвящена измерению коэффициента оптического поглощения кристаллов LNM на длине волны лазерного излучения 1064 нм. В настоящем исследовании коэффициенты оптического поглощения измерялись методом пьезорезонансной лазерной калориметрии (ПРЛК) [3]. Упрощённая схема экспериментальной

установки представлена на рис. 1. Все нелинейно-оптические кристаллы являются пьезоэлектриками. При совпадении частоты внешнего радиочастотного поля с частотой одной из собственных акустических мод исследуемого образца в спектре отклика наблюдается пьезоэлектрический резонанс. Было показано, что в случае однородного разогрева кристалла зависимость сдвига резонансных частот от температуры с хорошей степенью точности является линейной: $\Delta Rf_n(\Delta T) = K_n^{prt}\Delta T$, где K_n^{prt} – пьезорезонансный термический коэффициент n-ой моды [3]. Таким образом, при разогреве образца лазерным излучением изменение его температуры можно определить по величине сдвига ΔRf какой-либо резонансной частоты. Коэффициент оптического поглощения определяется на основе сопоставления экспериментально измеренной кинетики разогрева кристалла лазерным излучением с решением нестационарного уравнения теплопроводности. Значение измеренного описанным методом коэффициента оптического поглощения кристалла LNM на длине волны 1064 нм составило $(1{,}4 \pm 0{,}3)\cdot 10^{-3}$ см$^{-1}$.

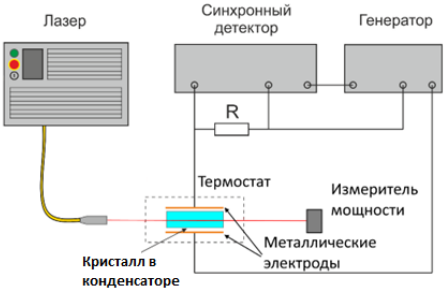


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки для измерения коэффициентов оптического поглощения методом ПРЛК, отклик кристалла на воздействие радиочастотного поля от генератора регистрируется с помощью измерения напряжения на нагрузочном сопротивлении синхронным детектором

Работа выполнена в рамках госзадания.

Список литературы

1. Hamza H., et al. // Acta Crystallographica E. 2012. V. 68. No. 11. P. i80-i81.
2. Zhang W., et al. // Chemistry of Materials. 2016. V. 28. No. 12. P. 4483-4491.
3. Ryabushkin O.A., et al. // Journal of the European Optical Society. P. 2011. V. 6. P. 11032.

УДК 535(06)+004(06)

В.Е. РОГАЛИН, В.Ю. ЖЕЛЕЗНОВ[1], Т.В. МАЛИНСКИЙ[1],
Ю.В. ХОМИЧ, Г.В. АФОНИН[1], В.А. ХОНИК[1]
Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург
[1]Воронежский государственный педагогический университет

ВЛИЯНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НАНОСЕКУНДНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ УФ-ЛАЗЕРА НА МОДУЛЬ СДВИГА МОНОКРИСТАЛЛОВ АЛЮМИНИЯ

Приведены результаты экспериментов по сканирующему воздействию излучения наносекундного частотно-импульсного УФ-лазера при плотности энергии ~ 1-5 Дж/см^2, на поверхности кубиков из монокристалла алюминия (размер грани 2.5 мм). До и после воздействия измерены шероховатость (Sa) поверхности образцов, и значения относительного изменения модуля сдвига металла при температурах до 650 °С.

V.E. ROGALIN, V.Yu. ZHELEZNOV, T.V. MALINSKIY,
Yu.V. KHOMICH, G.V. AFONIN[1], V.A. KHONIK[1]
Institute for Electrophysic and Electric Power Engineering of tke RAS, Saint-Petersburg
[1]Voronezh State Pedagogical University

INFLUENCE OF EXPOSURE OF UV LASER NANOSECOND PULSES ON THE SHEAR MODULUS OF ALUMINUM SINGLE CRYSTALS

The results of experiments on the scanning effect of radiation from a nanosecond frequency-pulse UV laser at an energy density of ~ 1-5 J/cm^2 on the surface of aluminum single crystal cubes (face size 2.5 mm) are presented. Before and after impact, the roughness (Sa) of the surface of the samples and the values of the relative change in the shear modulus of the metal at temperatures up to 650 °C were measured.

Короткие лазерные импульсы, длительностью ~ 10 нс при взаимодействии с поверхностью вещества, позволяют создать высокие скорости, и нагрева, и охлаждения материала [1]. Остывание этого слоя также происходит за время ~ 40 нс. При плотности энергии W_p ~ 1 - 5 Дж/см^2, за это время в результате плавления и испарения изменяется кристаллическая структура поверхностного слоя материала.

Исследовано влияние таких лазерных импульсов на образование дефектов структуры на поверхности кубиков из монокристаллического алюминия с размером грани 2.5 мм с помощью методики бесконтактного

прецизионного измерения высокочастотного (≈ 200 кГц) модуля сдвига посредством электромагнитно-акустического преобразования (ЭМАП) [2].

Все поверхности образцов подвергались сканирующему воздействию излучения УФ-лазера (длина волны 355 нм, энергия импульса до 2 мДж, частота следования 100 Гц, при $W_p \sim 1.1$, 2.4 и 5.3 Дж/см^2, соответственно). Скорость сканирования подбиралась таким образом, чтобы на конкретный участок поверхности попадало ~ 30 импульсов. Методика описана в [3]. До и после воздействия на оптическом профилометре NewView 7300 (Zygo, США) измерены шероховатость (Sa) поверхности образцов, а на установке ЭМАП измерены значения относительного изменения модуля сдвига при температурах до 650 °C. По изменению квадрата первой резонансной частоты определялось относительное изменение модуля сдвига. Данные приведены в табл. 1. Видно, что с увеличением W_p относительные изменения увеличиваются, но зависимость носит нелинейный характер.

Таблица 1. Изменения резонансных частот при разных W_p

№	W_p, Дж/см^2	f_{alt} после лазерного воздействия, кГц	f_{an} после отжига, кГц	$\Delta G = f^2_{alt}/f^2_{an} - 1$
S1	1.1	673.204	676.158	-0.0087
S2	2.4	574.976	578.674	-0.0127
S3	5.3	683.226	688.244	-0.0145

Результаты свидетельствуют о том, что возникшая дефектная микроструктура хорошо объясняется в рамках межузельной теории [2]. Междоузельные атомы, видимо, продиффундировали на поверхность по механизму аномального массопереноса, зарегистрированному при импульсных воздействиях на металлы [4].

Лазерное воздействие проводилось в ИЭЭ РАН в рамках государственного задания по научной деятельности № 75-03-2022-056.

Список литературы

1. Малинский Т.В., Рогалин В.Е., Ямщиков В.А. // ФММ. 2023. Т. 123 (2). С. 192.
2. Кобелев Н.П., Хоник А.А. // УФН. 2023. Т. 193 (7). С. 717.
3. Железнов Ю.А., Малинский Т.В. и др. // Письма о материалах. 2014. Т. 4 (1). С. 45.
4. Малинский Т.В., Рогалин В.Е. и др. // ФММ. 2022. Т. 124 (7). С. 653.

М.А. КУРНИКОВ[1], А.И. ШУГУРОВ[1], С.Б. БОДРОВ[1,2],
М.И. БАКУНОВ[1]
[1]Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
[2]Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

ЧЕРЕНКОВСКАЯ СХЕМА ГЕНЕРАЦИИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ОПТИЧЕСКОМ ВЫПРЯМЛЕНИИ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КРИСТАЛЛАХ

Предложена практически удобная схема конверсии фемтосекундных лазерных импульсов в терагерцовое излучение в полупроводниковых кристаллах с квадратичной нелинейностью. Экспериментально продемонстрирована конверсия лазерных импульсов с длиной волны 1.54 мкм, длительностью 140 фс и энергией 11 мкДж в широкополосное (с частотами до ~ 2.5 ТГц) терагерцовое излучение с эффективностью около 2×10^{-5}.

M.A. KURNIKOV[1], A.I. SHUGUROV[1], S.B. BODROV[1,2],
M.I. BAKUNOV[1]
[1]Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod
[2]Institute of Applied Physics of the RAS, Nizhny Novgorod

CHERENKOV SCHEME OF TERAHERTZ GENERATION VIA OPTICAL RECTIFICATION IN SEMICONDUCTOR CRYSTALS

We propose a convenient scheme for converting femtosecond laser pulses to terahertz radiation in semiconductor crystals with second-order nonlinearity. By using this scheme, laser pulses of a 1.54 μm wavelength, 140 fs duration, and 11 μJ energy were converted to wideband terahertz radiation (~ 2.5 THz bandwidth) with the efficiency of about 2×10^{-5}.

Оптическое выпрямление ультракоротких лазерных импульсов в электрооптических кристаллах – распространённый метод генерации терагерцового излучения. Наиболее эффективными являются неколлинеарные схемы оптического выпрямления в кристаллах ниобата лития – схема с накачкой скошенными лазерными импульсами [1] и черенковская схема [2]. Однако недавно была продемонстрирована перспективность использования полупроводниковых кристаллов с накачкой скошенными лазерными импульсами достаточно большой длины волны, чтобы обеспечить подавление многофотонного поглощения

низкого порядка [3]. В настоящей работе исследуется перспективность использования полупроводников в черенковской схеме.

В экспериментах использовался кристалл GaP, накачиваемый импульсами параметрического усилителя (Parus, Avesta) с длиной волны 1.54 мкм, длительностью 140 фс, частотой повторения 1 кГц и энергией до 11 мкДж. Оптический пучок фокусировался цилиндрической линзой с фокусным расстоянием 5 см в линию, заводился в кристалл под углом Брюстера ≈ 72 ° и распространялся в кристалле под черенковским углом ≈ 18 ° к нормали. Половина генерируемого черенковского клина падала нормально на выходную грань кристалла и выходила в свободное пространство. На рис. 1 представлена зависимость эффективности оптико-терагерцовой конверсии от интенсивности накачки для кристаллов толщиной 1, 3 и 5 мм. Максимальная эффективность в эксперименте достигала 2×10^{-5}, что на порядок больше эффективности, получаемой в коллинеарной схеме [4]. На рис. 2 показаны спектры сигнала при интенсивностях 20 и 65 ГВт/см^2 для кристалла толщиной 3 мм. Из графиков видно, что с увеличением интенсивности спектр сужается. Это может быть объяснено влиянием трёхфотонной ионизации кристалла на поглощение в высокочастотной области терагерцового спектра.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (22-19-00371).

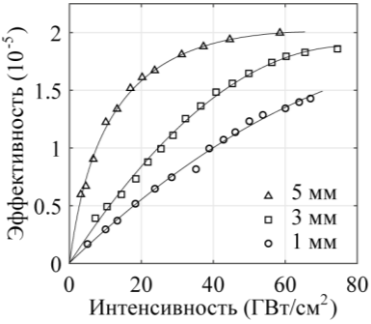


Рис. 1. Зависимость эффективности конверсии от интенсивности накачки для кристаллов GaP разной толщины

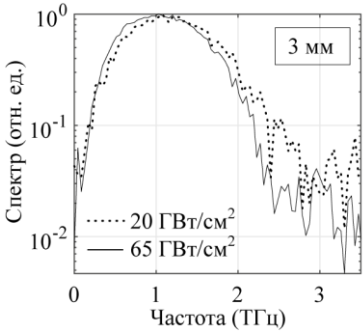


Рис. 2. Терагерцовые спектры при различной интенсивности накачки для кристалла толщиной 3 мм

Список литературы

1. Wang L., et al. // Laser Photonics Rev. 2020. V. 14. P. 2000021.
2. Abramovsky N.A., et al. // Opt. Lett. 2023. V. 48. P. 3203.
3. Polonyi M.I., et al. // Opt. Express. 2016. V. 24. P. 23872.
4. Barbiero G., et al. // J. Phys. B. 2020. V. 53. P. 125601.

УДК 535(06)+004(06)

Т.В. МАЛИНСКИЙ, В.Ю. ЖЕЛЕЗНОВ, В.Е. РОГАЛИН,
Ю.В. ХОМИЧ, И.А. КАПЛУНОВ[1], А.И. ИВАНОВА[1],
А.А. ШАЙКИН[2], С.Е. СТУКАЧЕВ[2], А.А. СЕРГЕЕВ[3], С.В. ИВАКИН[3]
Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург
[1]Тверской государственный университет
[2]Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
[3]Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург

ВЛИЯНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НАНОСЕКУНДНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ НЕОДИМОВОГО ЛАЗЕРА НА МОНОКРИСТАЛЛ ГЕРМАНИЯ В ВОДНОЙ СРЕДЕ

Сопоставлены результаты наномодификации Ge в воздушной и водной средах с помощью наносекундного Nd-лазера при плотности энергии 20 - 50 Дж/см^2. Наблюдались следы плавления, испарения и последующей кристаллизации поверхностного слоя. В воде, в пятне возникало обширное углубление до 3 мкм.

T.V. MALINSKIY, V.Yu. ZHELEZNOV, V.E. ROGALIN,
Yu.V. KHOMICH, I.A. KAPLUNOV[1], A.I. IVANOVA[1],
A.A. SHAYKIN[2], S.E. STUKACHEV[2], A.A. SERGEEV[3], S.V. IVAKIN[3]
Institute for Electrophysic, and Electric Power Engineering of tke RAS, Saint-Petersburg
[1]Tver State University
[2]Institute of Applied Physics of the RAS, Nizhny Novgorod
[3]Baltic State Technical University "VOENMECH", Saint-Petersburg

INFLUENCE OF IMPACT TO NANOSECOND PULSES OF A NEODYMIUM LASER ON A GERMANIUM SINGLE CRYSTAL IN AN WATER ENVIRONMENT

The results of nanomodification of a Ge in air and water environments using a nanosecond Nd laser at an energy density of 20 - 50 J/cm^2 are compared. The results of melting, evaporation and subsequent crystallization of the surface layer were observed. In the water, in the spot area, a large depression of up to 3 μm appeared.

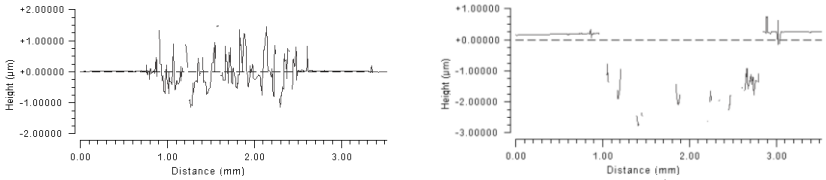
Монокристаллы германия являются отличным модельным материалом для изучения различных процессов в твёрдых телах благодаря тому, что германий давно и широко используется в электронике и оптике [1]. Его достоинства: моноэлементный состав, кристаллическая решётка, простая и хорошо изученная, высокая химическая чистота, отсутствие фазовых

переходов в конденсированном состоянии. В [2] изучалась наномодификация полированной поверхности германия наносекундным УФ-лазером. В данной работе исследования продолжены с помощью более мощного Nd-лазера.

Воздействию подвергалась поверхность {111} кристаллов марки ГМО n-типа с удельным сопротивлением 47 Ом·см. Исходная шероховатость: 50 - 60 Å. Энергия импульса составляла 0.5 - 1.0 Дж, а её плотность варьировалась в диапазоне – 20 - 50 Дж/см^2, при длительности 10 - 16 нс. Сопоставлялись результаты воздействия в воздушной и водной средах. Образцы размещались в пластиковой кювете. С целью ослабить деградационные эффекты, вызванные абляцией материала, в отдельных экспериментах использовано поглощающее покрытие из чёрного пластика толщиной ~ 200 мкм (остаточное отражение ~ 1 %). Слой воды над образцом ~ 1 мм. Исследование образцов до и после воздействия проведено на оптическом профилометре NewView 7300 (Zygo, США), а также на сканирующем электронном микроскопе (РЭМ) JEOL JSM 6610LV, в том числе с исследованием элементного состава поверхности.

Воздействие сопровождалось возникновением плазменного факела и значительным повреждением поверхности. Обнаружены результаты плавления, испарения и последующей кристаллизации поверхностного слоя. На рис. 1 сопоставлены профилограммы лазерных пятен на поверхности германия, полученные при плотности энергии 20 Дж/см^2, в воздухе и в воде. Воздействие в воде, в отличие от воздуха, создаёт в зоне пятна обширное углубление до 3 мкм.

Работа выполнена в рамках государственного задания по научной деятельности № 75-03-2022-056, № 0817-2023-0006 и FFUF-2021-0015 с использованием ресурсов ЦКП ТвГУ и ИПФ РАН.



а *б*

Рис. 1. Профилограммы лазерных пятен на поверхности германия, плотность энергии 20 Дж/см^2. в воздухе (*а*), в воде (*б*)

Список литературы

1. Каплунов И.А., Рогалин В.Е. // Фотоника. 2019. Т. 13 (1). С. 88.

2. Железнов В.Ю., Малинский Т.В. и др. // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2023. Т. 26 (2). С. 89.

М.О. ДИАБ[1,2], М.Н. ПОПОВА[2], К.Н. БОЛДЫРЕВ[2]
[1]Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный
[2]Институт спектроскопии РАН, Троицк

СПЕКТРЫ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ИОНОВ Er^{+3} В КРИСТАЛЛЕ K_2YF_5 ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЙ В ЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ КРИОТЕРМОМЕТРИИ

Были получены спектры люминесценции кристалла $K_2YF_5:Er^{3+}$ в различных температурных условиях в областях межмультиплетных переходов $^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ (приблизительно 1.5 мкм) с высоким разрешением. Предложены спектральные линии для создания больцмановского люминесцентного радиометрического криотермометра при температурах около 20, 40 и 60 K с относительной чувствительностью от 8 до 3 % K^{-1}.

M.O. DIAB[1,2], M.N. POPOVA[2], K.N. BOLDYREV[2]
[1]Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny
[2]Institute of Spectroscopy of the RAS, Troitsk

LUMINESCENCE SPECTRA OF Er^{+3} IONS IN K_2YF_5 CRYSTAL FOR APPLICATIONS IN LUMINESCENCE CRYOTHERMOMETRY

The luminescence spectra of $K_2YF_5:Er^{3+}$ crystal were obtained under various temperature conditions in the spectral regions of multiplet transitions $^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ (approximately 1.5 μm) with high resolution. Spectral lines are proposed for the development of a Boltzmann luminescence ratiometric cryothermometer at temperatures around 20, 40, and 60 K, with relative sensitivities ranging from 8 to 3 % K^{-1}.

Кристаллы с редкоземельными элементами, представляют собой материалы с множеством функций. Многие из таких кристаллов уже используются в качестве сред для лазеров, люминесцентных материалов, включая их применения в дисплеях, матрицах для создания квантовой памяти, а также в роли сред для оптического охлаждения объектов, и так далее. Ещё одним интересным применением является возможность бесконтактного измерения температуры объекта с использованием метода люминесцентной термометрии [1].

Зарегистрированы спектры фотолюминесценции кристалла $K_2YF_5:Er^{3+}$ в диапазоне температуры (3.5 → 90) K на фурье-спектрометре

Bruker IFS 125 HR с разрешением 0.01 см$^{-1}$ в спектральном диапазоне переходов с уровней штарковского мультиплета $^4I_{13/2}$ на уровни основного мультиплета $^4I_{15/2}$. Кристалл охлаждался с помощью криостата замкнутого гелиевого цикла (Sumitomo SRP096) (3.5 → 90) K с шагом 1 K. Для возбуждения люминесценции был использован диодный лазер (P = 100 мВт, λ_{ex} = 808 нм). Возбуждение осуществлялось в нижний штарковский уровень $^4I_{9/2}$ иона Er^{3+} [2].

В результате получена температурная зависимость отношения *LIR*(T) интеграл-интенсивностей линий (6455 см$^{-1}$, B → 5) и (6424 см$^{-1}$, A → 5) (рис. 1), что в том числе поясняет идентификацию линий. Отмечено хорошее соответствие экспериментальных результатов больцмановскому распределению населенностей на уровнях B и A (ΔE = 31 см$^{-1}$).

Рис. 2 иллюстрирует абсолютную (S_a) и относительную (S_r) чувствительности в температурной зависимости, где максимальная абсолютная чувствительность наблюдается при температуре 22.5 K, а относительная чувствительность при этом составляет 8 % K^{-1}.

Показано, что $K_2YF_5:Er^{3+}$ кристалл обладает значительным потенциалом для реализации метода люминесцентной криотермометрии. Выбраны спектральные линии, позволяющие измерять температуру в пределах от 3.5 до 90 K [3].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (в рамках гранта № 23-12-00047).

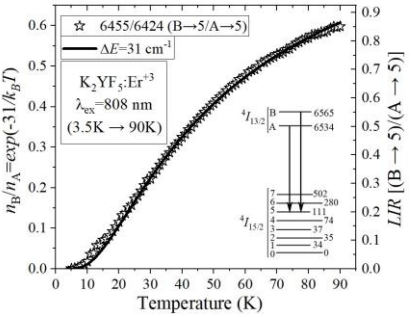


Рис. 1. *LIR* переходов (B → 5) и (A → 5) отношения населенностей n_B/n_A в больцмановском распределении

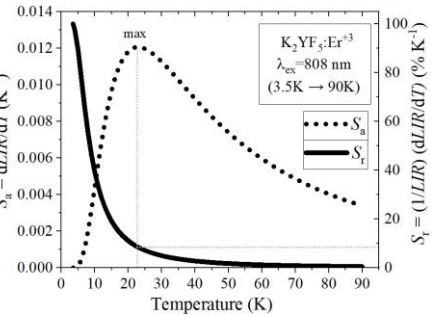


Рис. 2. Температурные зависимости абсолютной S_a и относительной S_r чувствительностей

Список литературы

1. Brites C.D.S., Balabhadra S., et al. // Adv. Optical Mater. 2019. V. 7. P, 801239.
2. Peale R.E., Weidner H., et. al. // Advanced Solid State Lasers. 1997. V. 10. P. 462-466.
3. Болдырев К.Н., Диаб М. и др. // Оптика и спектроскопия. 2023. Т. 131. Вып. 10. С. 1335.

УДК 535(06)+004(06)

И.А. ШУКЛОВ
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный

НОВЫЕ ПРЕКУРСОРЫ СЕЛЕНА И ТЕЛЛУРА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КОЛЛОИДНЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК

Коллоидные квантовые точки селенидов и теллуридов ртути и свинца являются одними из наиболее перспективных материалов для фотосенсорики в ближнем и среднем ИК-диапазонах. Приведены результаты по использованию новых прекурсоров селена и теллура для получения наночастиц HgTe, HgSe и PbTe. Синтезы с разработанными реагентами обладают большей воспроизводимостью и низкими требованиями к оборудованию.

I.A. SHUKLOV
Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

NEW PRECURSORS OF SELENIUM AND TELLURIUM FOR THE PREPARATION OF COLLOIDAL QUANTUM DOTS

Colloidal quantum dots of mercury and lead selenides and tellurides are promising nanomaterials exhibiting an excellent photosensitivity in the near-IR and mid-IR ranges. New precursors of selenium and tellurium were developed and applied in the preparation of colloidal nanoparticles (HgTe, HgSe, PbTe). Novel synthetic procedures have improved reproducibility and low requirements to the equipment.

Коллоидные квантовые точки (ККТ) селенидов и теллуридов свинца и ртути (HgTe, HgSe, PbSe, PbTe) привлекают к себе пристальное внимание научного сообщества и индустрии, так как они обладают отличной фоточувствительностью в диапазоне от ближнего до среднего ИК для HgSe / PbSe и даже дальнего ИК для HgTe, и шириной запрещённой зоны от 0 до 0.32 эВ для объёмных материалов. [1] Уникальное сочетание широкополосного поглощения с большим радиусом экситона Бора делает вышеназванные халькогениды перспективными материалами для применений в фотодетекторах и электролюминесцентных устройствах [2].

Для практического применения коллоидных квантовых точек и создания фотосенсоров на их основе требуются методы получения ККТ данных халькогенидов для разных диапазонов спектра. Кроме того, в последнее время возникла необходимость в создании реагентов на основе химического сырья, производимого российской промышленностью.

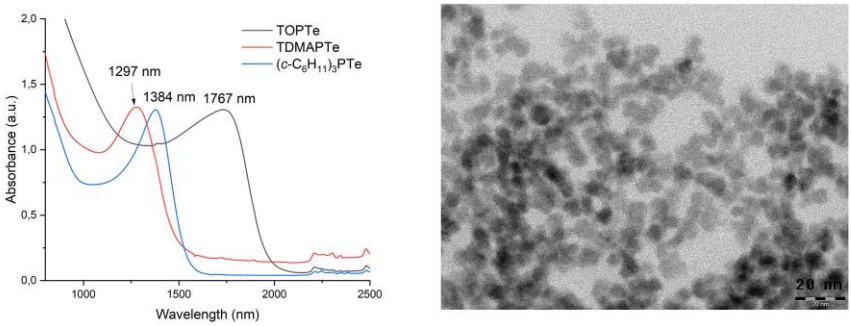


Рис. 1. Спектр поглощения и микрофотография ПЭМ ККТ HgTe

Как правило, коллоидные квантовые точки селенидов и теллуридов получают с использованием прекурсоров теллура и селена на основе триоктилфосфина (ТОФ).[3] В течении последних лет в нашей лаборатории были разработан ряд альтернатив – прекурсоров этих халькогенов.

Для синтеза ККТ HgTe был разработан прекурсор теллура на основе трициклогексилфосфина. Он более удобен в использовании и даёт более воспроизводимые результаты в синтеза наночастиц чем ТОФ (рис. 1) [4]. С его помощью получены образцы ККТ HgTe с максимумом экситонного пика от 1380 до 2800 нм. Синтез ККТ PbTe возможен с его помощью. Синтез ККТ селенидов свинца и ртути возможен с использованием реагента на основе селена и децена-1. [5]

Работа поддержана фондом РНФ (Проект № 23-23-00300).

Список литературы

1. Shuklov I.A., Razumov V.F. // Russian Chemical Reviews. 2020. V. 89. P. 379.

2. García de Arquer F.P., Talapin D.V., Klimov V.I., Arakawa Y., Bayer M., Sargent E.H. // Science. 2021. V. 373. P. 8541.

3. Ganeev R.A., Shuklov I.A., Zvyagin A.I., Dyomkin D.V., Smirnov M.S., Ovchinnikov O.V., Lizunova A.A., Perepukhov A.M., Popov V.S., Razumov V.F. // Optics Express. 2021. V. 9.No. 11. P. 16710-16726.

3. Shuklov I.A., Mardini A.A., Skabitsky I.V., Dubrovina N.V., Perepukhov A.M., Lizunova A.A., Razumov V.F. // Nano-Structures & Nano-Objects. 2023. V. 35. P. 101020.

4. Shuklov I.A., Milenkovich T., Majorova A.V., Seraya O., et al. // Прикладная физика. 2023.

УДК 535(06)+004(06)

И.В. МАРГАРЯН, Л.Н. БОРОДИНА, А.А. ВЕДЕРНИКОВА,
Е.В. УШАКОВА, А.П. ЛИТВИН[1]
Университет ИТМО, Санкт-Петербург
[1]Цзилиньский университет, Чанчунь, Китай

МОДИФИКАЦИЯ АНТИРАСТВОРИТЕЛЯ УГЛЕРОДНЫМИ ТОЧКАМИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРОВСКИТНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В работе рассматривается влияние антирастворителя хлорбензола, модифицированного N-содержащими углеродными точками (УТ) из этилендиамина и о-фенилендиамина, на свойства перовскитного соля и перовскитных солнечных элементов на их основе. Были проведены исследования УТ и перовскитного слоя просвечивающей электронной микроскопией, атомно-силовой микроскопией, конфокальной лазерной сканирующей микроскопии. УТ обеспечили рост эффективности преобразования солнечной энергии за счёт взаимодействия поверхностных функциональных групп с дефектами на поверхности перовскитного слоя и на границах зёрен, что обеспечило уменьшение плотности дефектов и безызлучательную рекомбинацию, связанную с ними.

I.V. MARGARYAN, L.N. BORODINA, A.A. VEDERNIKOVA,
E.V. USHAKOVA, A.P. LITVIN[1]
ITMO University, Saint-Petersburg
[1]Jilin University, Changchun, China

MODIFICATION OF THE ANTI-SOLVENT WITH CARBON DOTS TO INCREASE THE EFFICIENCY OF PEROVSKITE SOLAR CELLS

The work considers the effect of chlorobenzene antisolvent modified with N-containing carbon dots (CDs) on the properties of perovskite layer and perovskite solar cells based on them. The results of studies of the CDs and the perovskite layer obtained using transmission electron microscopy, atomic force microscopy, confocal laser scanning microscopy are presented. CDs provide higher efficiency of solar energy conversion due to the interaction of surface functional groups with defects on the surface of perovskite layer and at grain boundaries, which ensured a decrease in the density of defects and non-radiative recombination associated with them.

Нанесение антирастворителя (АР) на перовскитную плёнку является основным подходом получения однородного слоя и высокоэффективных

перовскитных солнечных элементов. Использование АР способствует процессу роста зёрен перовскита за счёт взаимодействия с растворителем перовскита, что приводит к удалению последнего, и стимулированию рост зёрен перовскита. Несмотря на то, что АР обеспечивают получение однородного слоя, дефекты, возникающие в результате получения из растворов и во время отжига слоя, остаются нетронутыми [1].

Целью работы является исследование пассивации дефектов на поверхности перовскитного слоя при взаимодействии с модифицированным углеродными точками (УТ) АР хлорбензола. На рис. 1 показана вольтамперная характеристика контрольного образца и образца, полученного с помощью модифицированного АР. Максимальная эффективность 10.8 % контрольного образца значительно выросла и составила 14.5 % при использовании модифицированного АР. Это преимущественно обусловлено ростом тока короткого замыкания (J_{SC}) с 22.6 до 25.3 мАсм$^{-2}$ [2]. На рис. 2 показаны оптическое и фотолюминесцентные изображения перовскитного слоя при различных спектральных режимах, полученного с помощью модифицированного АР. Видно, что УТ распределены преимущественно на границах зёрен. Так как плотность дефектов в перовскитах максимальна на поверхности слоя, при таком распределении возможно эффективное образование координационных связей между N-содержащими УТ и положительно заряженными ионами Pb^{2+} на границах зёрен, которые являются одними из основных причин безызлучательной рекомбинации и уменьшения плотности тока, что приводит к уменьшению коэффициента заполнения и эффективности перовскитных солнечных элементов [3].

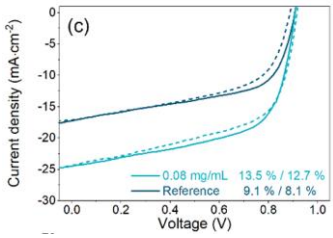


Рис. 1. Вольтамперная характеристика контрольного образца и образца с 0.08 мг/мл УТ

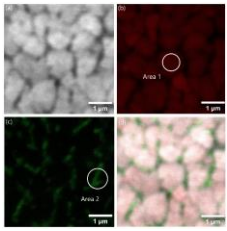


Рис. 2. Изображения перовскитного слоя, полученные при конфокальной лазерной сканирующей микроскопии

Список литературы

1. Elahe Kh, Behzad R. // ACS Appl. Mater. Interface. 2022. V. 14. P. 54623-54634.
2. Ma Y., Zhang H. // ACS Appl. Mater. Interface. 2018. V. 11 (3). P. 3044-3052.
3. Wang Y., Zhang J. // J. Mater. Sci. 2018. V. 53. P. 9180-9190.

УДК 535(06)+004(06)

Т. МИЛЕНКОВИЧ, И.А. ШУКЛОВ, А.А. МАРДИНИ,
А.А. КОРОННОВ, К.Т. ХАКИМОВ, В.С. ПОПОВ
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный

ВЛИЯНИЕ ЗАМЕНЫ ЛИГАНДОВ НА СВОЙСТВА ФОТОРЕЗИСТОРОВ НА ОСНОВЕ КОЛЛОИДНЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК ХАЛЬКОГЕНИДОВ РТУТИ

Приведены результаты серии экспериментов с целью создания фоточувствительных тонких слоёв на основе коллоидных квантовых точек (ККТ) халькогенидов ртути в зависимости от замены лигандов и исследования их характеристик. ККТ были нанесены методом spin-coating в инертной аргоновой среде и на воздухе. С помощью атомно-силовой микроскопии был проведён анализ морфологии поверхности и толщины полученных плёнок. Фоторезисторные структуры были созданы нанесением ККТ с послойной заменой лигандов на золотые встречно-штыревые электроды и определены их электрофизические характеристики.

T. MILENKOVICH, I.A. SHUKLOV, A.A. MARDINI,
A.A. KORONNOV, K.T. KHAKIMOV, V.S. POPOV
Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

STUDY OF THE IMPACT OF LIGAND EXCHANGE ON PROPERTIES OF PHOTORESISTORS BASED ON MERCURY CHALCOGENIDES

The result of experiments on the ligand-exchange dependent properties of mercury-chalcogenides colloidal quantum dots thin films are presented. Layer-by-layer deposition technique applying spin-coating was used for preparing thin films of colloidal quantum dots of mercury telluride, mercury sulfide and mercury selenide. By using atomic force microscopy, analysis of the surface morphology and thickness of the films was determined. Photoresistors were prepared with various ligand exchanges. Electro-physical characteristics of the fabricated devices were determined.

Коллоидные квантовые точки (ККТ) – нанокристаллические полупроводники, чья поверхность покрыта органическим монослоем, состоящим из координирующих лигандов. В силу квантово-размерного эффекта, оптические свойства коллоидных квантовых точек зависят от размера (диаметра) ядра полупроводника.

ККТ теллурида ртути привлекают к себе большое внимание в последнее десятилетие благодаря своими уникальными свойствами. [1] Комбинация большого радиуса экситона Бора (30 нм), ширины запрещённой зоны объёмного материала (0 eV) и спектральная перестраиваемость в диапазоне ИК обеспечивают перспективу в использовании в качестве разработок лазеров и фотодетекторов [2, 3] . Материалы на основе ККТ сульфида и селенида ртути слабо исследованы, а их фоточувствительность достигает диапазона спектра 3 - 5 мкм. В настоящей работе исследовались тонкие плёнки из ККТ халькогенидов ртути и фоторезисторы на их основе.

Методами «мокрой химии» из растворов колоидных квантовых точек халькогенида ртути создаются фоточувствительные тонкие плёнки. Состав лигандной оболочки сильно влияет на фотоэлектрические своства тонких плёнок [4].

В пределах работы, были созданы фоточувствительные тонкие плёнки ККТ халькогенидов ртути (HgTe, HgS и HgSe) на стеклянных подложках послойным нанесением с помощью метода spin-coating в двух разных средах – инертной аргоновой среде и на воздухе. Используя метод атомно-силовой микроскопии была изучена морфология поверхности, шероховатость полученных плёнок, а также толщина слоёв нанесений в зависимости от различных замен лигандов. В качестве замен для лигандов выбраны этандитиол-1,2, сульфид, иодид и роданид. Были созданы фоторезисторы путём нанесения слоёв коллоидных квантовых точек на золотые встречно-штыревые электроды на основе из окисленого кремния.

В рамках работы было произведено исследование созданных фоторезисторов при различных режимах засветки (980 нм, АЧТ). Получены вольт-амперные характеристики (ВАХ) резисторов на основе тонких плёнок ККТ халькогенидов ртути. Проанализированы полученные данные после замены исходных оболочек на I-, S^{2-}, SCN- и этандитиол-1,2.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-03-2023-106 от 13.01.2023 (Проект № FSMG-2022-0034).

Список литературы

1. Lhullier E., et. al. // Chem. Rev. 2021. V. 121 (7). P. 3627-3700.
2. Keuleyan S., et. al. // ASC Nano. 2014. V. 8 (8). P. 8676-8682.
3. Chen M., et al. // ASC Nano. 2017. V. 11 (6). P. 6514-5622.
4. Boles M., et al. // Nature Mater. 2016. V. 15. P. 141-153.
5. Shuklov I.A., Razumov V.F. // Russ. Chem. Rev. 2020. V. 89 (3). P. 379-391.

УДК 535(06)+004(06)

Д.В. КОНОНОВ, А.В. ПАЛЕХОВА, А.В. КОЧАКОВ,
А.В. АФАНАСЬЕВА, Т.А. ВАРТАНЯН, Д.Р. ДАДАДЖАНОВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

УСИЛЕНИЕ ХЕМИЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ЛЮЦИГЕНИНА В ПРИСУТСТВИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ

Представлены результаты экспериментов по усилению сигнала хемилюминесценции люцигенина в присутствии золотых плазмонных наночастиц. Определены усиления хемилюминесценции в зависимости от концентрации наночастиц, введённых в раствор люцигенина, и показателя pH раствора хемилюминофора.

D.V. KONONOV, A.V. PALEHOVA, A.V. KOCHAKOV,
A.V. AFANASIEVA, T.A. VARTANYAN, D.R. DADADZHANOV
ITMO University, Saint-Petersburg

CHEMILUMINESCENCE ENHANCEMENT OF LUCIGENIN IN THE PRESENCE OF METALLIC NANOPARTICLES

Presents the results of experiments on chemiluminescence signal amplification of lucigenin in the presence of gold plasmonic nanoparticles. The chemiluminescence enhancement was determined depending on the concentration of nanoparticles introduced into the lucigenin solution and depending on pH of the chemiluminophore solution.

Хемилюминесцентные сенсоры являются одними из самых активно используемых методов детектирования различных процессов внутри живых организмов: процесс лечения воспалений миелопероксидазой, клеточного дыхания и других. [1 - 3]. В этих целях используются хемилюминофоры – вещества, которые при химическом взаимодействии с аналитами или активными формами кислорода, испускают свет в видимом спектральном диапазоне [3]. С их помощью можно детектировать наличие заболеваний, воспалений, превышение в организме железа, азота, различных аминов [1 - 3]. Однако, хемилюминесцентные системы детектирования обладают существенным недостатком – низкой интенсивностью свечения [3]. В качестве решения данной проблемы применяются химические и физические методы [3]. Один из физических методов – использование плазмонных наночастиц, которые за счёт наличия ближнего поля способны усилить сигнал хемилюминесценции

[4]. Целью данной работой является установление условий наблюдения эффективного усиления хемилюминесценции люцигенина при использовании плазмонных наночастиц золота.

В ходе эксперимента водный раствор люцигенина с концентрацией 10^{-4} М смешивался водным раствором золотых наносфер, полученных методом лазерной абляции, затем в полученный раствор вводилась смесь растворов NaOH с разным значением pH и 3 % пероксида водорода. Для регистрации интенсивности хемилюминесценции использовался счётчик фотонов Hamamatsu H11890. Рост интенсивности хемилюминесценции люцигенина при различных уровнях pH раствора отличался (рис. 1) и, начиная с pH = 11, резко усиливался под действием возросшего количества гидроксид радикалов (OH^-). При добавлении в раствор люцигенина золотых наночастиц с различной концентрацией наблюдалось усиление хемилюминесцентного сигнала в два раза. Рост интенсивности хемилюминесценции при добавлении наночастиц золота ограничивался некоторым пороговым значением (рис. 2), который не зависел от концентрации добавленных наночастиц.

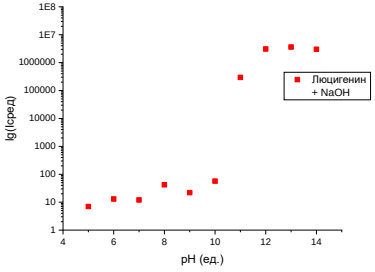


Рис. 1. Кинетика хемилюминесценции люцигенина в зависимости от pH раствора

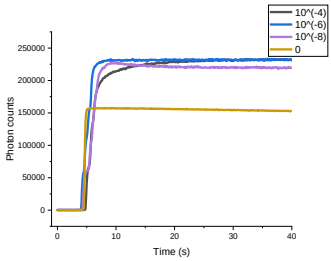


Рис. 2. Кинетика хемилюминесценции люцигенина в зависимости от концентрации наночастиц

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 23-72-00045.

Список литературы

1. Ромодин Л.А. // Acta Naturae (русскоязычная версия). 2021. Т. 13 (3). С. 90-100.
2. Tsunoda M., Imai K. // Analytica Chimica Acta. 2005. V. 541 (1-2). P. 13-23.
3. Vladimirov Y.A., Proskurnina E.V. // Biochemistry (Moscow). 2009. V. 74 (13). P. 1545-1566.
4. Xu S., Chen F. // RSC Adv. 2014. V. 4. P. 15664-15670.

УДК 535(06)+004(06)

Д.А. МУРАТОВ, Н.Э. НИКОЛАЕВ, Т.К. ЧЕХЛОВА
Российский университет дружбы народов, Москва

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТНЫХ СРЕД, СОДЕРЖАЩИХ МЕДНЫЕ И ЗОЛОТЫЕ НАНОЧАСТИЦЫ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ

Проведено исследование спектральных свойств композитной среды, содержащей медные и золотые наночастицы эллипсоидальной формы. Получены спектры отражения, пропускания и поглощения данной структуры при разных углах падения излучения и разной геометрии эллипсоидов. Проведено сравнение результатов для медных и золотых частиц. Проведено сравнение результатов исследований со спектральными характеристиками композитной среды с частицами сферической формы.

D.A. MURATOV, N.E. NIKOLAEV, T.K. CHEKHOVA
Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow

OPTICAL PROPERTIES OF COMPOSITE MEDIA CONTAINING COPPER AND GOLD NANOPARTICLES OF DIFFERENT SHAPES

A study of the spectral properties of a composite medium containing ellipsoidal copper and gold nanoparticles was carried out. The reflection, transmission, and absorption spectra of this structure are obtained at different radiation incidence angles and different geometry of ellipsoids. The results for copper and gold particles are compared. The dependences obtained are compared with the characteristics of the composite medium with spherical particles.

В последнее время большое внимание уделяется исследованию композитных сред с наночастицами. Такие среды обладают особыми свойствами, и могут быть использованы при создании нелинейных оптических устройств, сенсоров, устройств записи и передачи оптической информации [1]. Для конкретного использования композитных сред необходимо исследовать влияние на спектральные характеристики формы и материала частиц.

В работе проведено исследование оптических свойств композитной среды с медными и золотыми наночастицами эллипсоидальной формы с различными геометрическими параметрами. При анализе свойств такой среды использовалась модель эффективной среды Максвелла–Гарнетта

[1]. В работе получены выражения для коэффициентов отражения и пропускания композитной среды, содержащей медные и золотые наночастицы эллипсоидальной формы. Расчёты спектров проводились для случая, когда концентрация частиц в композите составляла 1 %.

Проведены расчёты спектров отражения, пропускания и поглощения композитной плёнки с медными или золотыми наночастицами эллипсоидальной формы при разных соотношениях главных полуосей эллипсоида вращения и разных углах падения излучения (рис. 1).

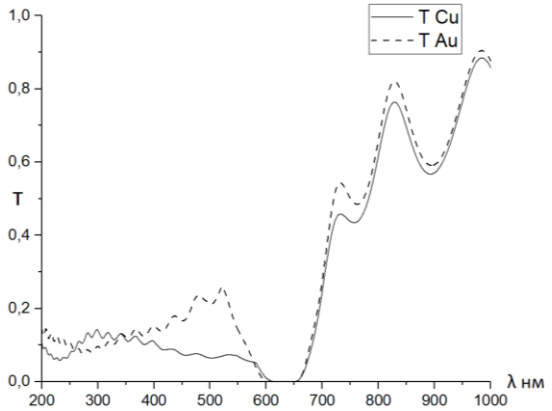


Рис. 1. Спектры пропускания композитных сред с медными и золотыми наночастицами сферической формы

Полученные спектры показывают зависимость положения и амплитуды пиков поглощения от формы наночастиц и угла падения излучения на композитную среду. Установлено, что при использовании наночастиц более вытянутой формы по сравнению со сферическими частицами спектры поглощения сдвигаются в длинноволновую область и происходит расширение полосы поглощения. Анализ полученных спектров показал минимальные отличия спектров поглощения при использовании медных и золотых наночастиц.

Полученные результаты позволяют учесть влияние формы и материала наночастиц на спектральные характеристики композитной среды и прогнозировать необходимые параметры для конкретного использования.

Список литературы

1. Головань Л.А., Тимошенко В.Ю., Кашкаров П.К. Оптические свойства композитов на основе пористых систем // Успехи физических наук. 2007. Т. 177. № 6. С. 619-638.

УДК 535(06)+004(06)

И.И. КОН, Д.А. ПОЛТОРАБАТЬКО, А.Ю. ЗЮБИН, И.Г. САМУСЕВ
Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕКИХ СВОЙСТВ НАНОЧАСТИЦ ЗОЛОТА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ РАЗНОСТЕЙ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ (FDTD)

Приведены результаты численного моделирование FDTD методом оптических параметров золотых наносфер и наноцилиндров в широком размерном диапазоне при взаимодействии полихроматического лазерного излучения 200 - 1000 нм. Рассчитывались такие параметры нанообъектов как нормированное значение поперченного сечения поглощения, рассеяния и экстинкции; а также величины максимума напряжённости электрического поля.

I.I. KON, D.A. POLTORABATKO, A.Yu. ZYUBIN, I.G. SAMUSEV
Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad

NUMERICAL SIMULATION OF OPTICAL PROPERTIES OF GOLD NANOPARTICLES USING FINITE-DIFFERENCE TIME-DOMAIN METHOD (FDTD)

The results of numerical modeling of FDTD by the method of optical parameters of gold nanospheres and nanocylinders in a wide size range, with the interaction of polychromatic laser radiation of 200 - 1000 nm, are presented. The following parameters of nanoobjects were calculated: the normalized value of the cross section absorption, scattering and extinction; as well as the magnitude of the maximum electric field strength.

Металлические наночастицы золота (Au) демонстрируют относительно высокие значения поглощение и рассеяние света в видимой области. Плазмонно-оптические отклики этих металлических наночастиц можно настроить, изменяя форму и размер наночастиц попадая в области плазмонного резонанса для получения пиковых значений в различных областях спектра. Возможность создания наночастиц различной формы и геометрии, контролируя оптические свойства, делают их применимыми в методах отслеживания, визуализации и обнаружения молекул [1].

Целью работы является численного моделирования эффекта локализованного поверхностного плазмонного резонанса (ЛППР) многофункциональных методом FDTD [2], который применялся нами при моделировании золотых наносфер радиусом 20, 40, 60, 80, 100 нм и

наноцилиндров высотой 100 нм. Рассчитываются значения напряжённости электрического поля (E) вблизи поверхности наностержней (рис. 1). Также с помощью набора сценариев и команд скрипта значения E поля были пересчитаны в значения поперечного сечения: поглощения, рассеяния и экстинкции. Если быть точнее эти параметры рассчитываются через мощность потока интегрированием вектора Пойтинга по поверхности [3]. Величина мощности нормировались по мощности входящего источника, получая значение поперечного сечения, как пример, экстинкции по частоте:

$$\sigma_{ext}(\omega) = \frac{P_{ext}(\omega)}{t_{ext}(\omega)} \quad (1)$$

Нормированные значения экстинкции для наносфер не зависели линейно от размера что было связано со световыми потоками по-разному огибающими наночастицы различных форм [4]. Однако численные расчёты оптических параметров с достаточной точностью совпадали с аналитическими. Такие подходы были корректно применены для расчёта наночастиц отличной от наносферы геометрии (рис. 2).

Значение максимумов (E) могут служило надёжными характеристиками величины ЛППР, что используется, например, в методах высокочувствительной индикации [5].

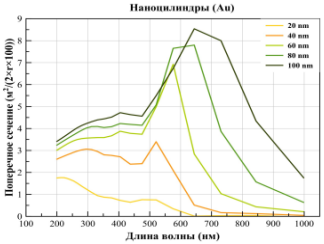


Рис. 1. Максимальные значения напряжённости (E) поля золотых наноцилиндров распределённые по резонансной длине волны

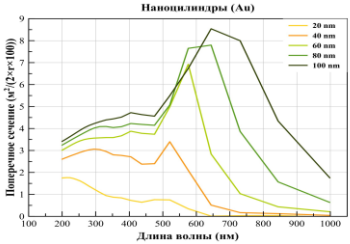


Рис. 2. Нормированные значения поперечного сечения экстинкции золотых наноцилиндров распределённые по длине волны

Список литературы

1. Esfahani M. Y. // Biosensors. 2020. V. 10 (7), P. 77.
2. Schneider J.B. // Sch. of elect. Eng. and comp. sc. Washington State University. 2010.V. 28.
3. Huang X., et al. // Proc. of the Intern. Symp. on Antennas & Propagation. 2013 V. 1.
4. Bashevoy M.., et al. // Optics Express. 2005. V. 13 (21). P. 8372-8379.
5. Kurt H., et al. // Analytica Chimica Acta. 2021 V. 1185. P. 338842.

УДК 535(06)+004(06)

А.В. КОЧАКОВ, А.А. МИТУСОВА[1], Д.В. КОНОНОВ, Д.Р. ДАДАДЖАНОВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург
[1]Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И.П. Павлова

СПЕКТРОСКОПИЯ ЗОЛОТЫХ И СЕРЕБРЯНЫХ НАНОЧАСТИЦ В РАКОВЫХ КЛЕТКАХ

Были синтезированы золотые плазмонные наночастицы методом восстановления золотохлористоводородной кислоты ($HAuCl_4$) с последующей модификацией поверхности с помощью биосовместимого полимера. Наночастицы были внедрены в опухолевые клетки линий лейкемии и меланомы. Сдвиг плазмонного резонанса на спектрах поглощения в длинноволновую область свидетельствуют об эндоцитозе наночастиц раковыми клетками.

A.V. KOCHAKOV, A.A. MITUSOVA[1], D.V. KONONOV, D.R. DADADZHANOV
ITMO University, Saint-Petersburg
[1]Pavlov First Saint-Petersburg State Medical University

SPECTROSCOPY OF GOLD AND SILVER NANOPARTICLES IN CANCER CELLS

Gold plasmonic nanoparticles were synthesized by the reduction of chloroauric acid ($HAuCl_4$) followed by surface modification using a biocompatible polymer. Nanoparticles were introduced into tumor cells of leukemia and melanoma lines. A shift of plasmon resonance in the absorption spectra to longer wavelengths indicates endocytosis of nanoparticles by cancer cells.

Внутриклеточный транспорт является важной и актуальной темой в современных исследованиях, в связи с серьёзными побочными эффектами от лекарств, распределённых по всему организму, необходимых для лечения сложных заболеваний. Перспективы внедрения новых технологий в данную тематику, в частотности, наноматериалов, ограничиваются зачастую тем, что биофизические исследования проводятся без общего согласования между ними, что даёт неоднозначное понимание картины поведения наноматериалов в биологических средах. Эффективность инкубации наночастиц в клетки, в свою очередь, является важным вектором развития внутриклеточного транспорта. Эффективность

инкубации может зависеть от таких факторов, как: размер, форма и заряд наночастиц [1].

В данной работе золотые наночастицы были инкубированы в раковые клетки линий лейкемии (K562) и меланомы (B16). Синтез наночастиц проводился по методу Туркевича, заключающийся в доведении до кипения 20 мл 1 мМ раствора золотохлористоводородной кислоты, добавлении 2 мл 38.8 мМ раствора тринатрий цитрата и перемешивании в течение 10 минут [2]. Диаметр наночастиц (37 нм) был определён путём расчёта сечения экстинкции одиночной наночастиц и сопоставления экспериментального спектра поглощения наночастиц [3].

В качестве питательной средой для клеток линии меланомы был выбран раствор RPMI с 10 % FBS, а для линии лейкемии – раствор ДМЕМ с 10 % FBS. При инкубировании в лунку с клетками добавлялось 100 мкл раствора с золотыми наночастицами. В инкубаторе, при температуре 37 °C и 5 % CO_2, клетки выдерживались несколько временных этапов: 1, 4 и 72 ч., затем вынимались. Контрольные группу каждой линии клеток выдерживалась в инкубаторе без металлических наночастиц. От лунки клетки отделялись с помощью трипсина. Для клеточных растворов, также были получены спектры поглощения. Было выявлено, что на спектрах суспензии клеток лейкемии с наночастицам наблюдается максимум поглощения в районе 530 нм, соответствующему плазмонному резонансу в наночастицах. Было также установлено, что требуется более двух дней, чтобы наночастицы эффективно поглотилось клетками.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 22-72-10057.

Список литературы

1. Behzadi S., Serpooshan V., Tao W., Hamaly M.A., Alkawareek M.Y., Dreaden E.C., Brown D., Alkilany A.M., Farokhzad O.C., Mahmoudi M. Cellular uptake of nanoparticles: journey inside the cell // Chem Soc Rev. 2017. V. 46 (14). P. 4218-4244.

2. Wuithschick M., et al. Turkevich in new robes: key questions answered for the most common gold nanoparticle synthesis // ACS Nano. 2015. V. 9. No. 7. P. 7052-7071.

3. Kelly K.L., Coronado E., Zhao L.L., George C. // Schatz The Journal of Physical Chemistry. 2003. V. 107 (3). P. 668-677.

Е.О. ЕПИФАНОВ[1], А.О. РЫБАЛТОВСКИЙ[1,2],
В.И. ЮСУПОВ[1], Н.В. МИНАЕВ[1]
[1]*Институт фотонных технологий ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Троицк*
[2]*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУР ИЗ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА В НАНОПОРИСТЫХ КВАРЦЕВЫХ СТЕКЛАХ ФЕМТОСЕКУНДНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

В работе были получены результаты по исследованию процесса формирования микроструктур из наночастиц серебра в нанопористых кварцевых стеклах с использованием низкоэнергетического фемтосекундного лазерного воздействия. Образцы стекла были импрегнированы прекурсором серебра в сверхкритическом CO_2. Обнаружено, что формирование микроструктур происходит за счёт фото- и терморазложения прекурсора, с образованием наночастиц серебра и структур из них. Также была представлена качественная модель, объясняющая процессы формирования кластеров в объёме стекла.

E.O. EPIFANOV[1], A.O. RYBALTOVSKIY[1,2],
V.I. YUSUPOV[1], N.V. MINAEV[1]
[1]*Institute of Photonic Technologies FSRC «Crystallography and Photonics» of the RAS, Troitsk*
[2]*Lomonosov Moscow State University*

FORMATION OF MICROSTRUCTURES FROM Ag NANOPARTICLES IN NANOPOROUS QUARTZ GLASS BY FEMTOSECOND LASER RADIATION

The work obtained results on the study of the process of formation of microstructures from silver nanoparticles (Ag NPs) in nanoporous quartz glasses using low-energy femtosecond laser exposure. Glass samples were impregnated with a silver precursor in supercritical CO2. It was discovered that the formation of microstructures occurs due to photo- and thermal decomposition of the precursor, with the formation of silver nanoparticles and structures from them. A qualitative model was also presented to explain the processes of cluster formation in glass volume.

В работе применялся фемтосекундный источник лазерного излучения с длиной волны 525 нм, частотой 70 МГц, длительностью импульса 200 фс и энергией в импульсе до 1 нДж. Образцы нанопористых стёкол

импрегнировались в $скCO_2$ прекурсором серебра Ag(hfac)COD, а затем облучались сфокусированным лазерным излучением. При лазерном воздействии на поверхность и в объём образцов пористого стекла, насыщенного прекурсором Ag происходит фото- и терморазложение прекурсора с образованием наночастиц (НЧ) Ag и последующей их кластеризацией (рис. 1а). Микроструктуры на поверхности образцов нанопористых стёкол состоят из кластеров НЧ Ag и обладают коричневой окраской (рис. 1б).

При рисовании линейных структур мощность излучения составляла 20 мВт, а скорость перемещения образца 50 мкм/с. В таком режиме лазерного воздействия на стекле не образуется дефектов, а структуры можно удалить путём нагрева образца до 700 ^{0}C в печи в течение 5-10 мин. Однако, при увеличении мощности до 80 мВт, в стекле образуются дефекты вследствие нагрева лазерным излучением НЧ Ag до температур плавления стекла (~ 1000 ^{o}C) (рис. 1в). Такие структуры могут представлять интерес в области записи информации на твердотельные носители с повышенным сроком хранения.

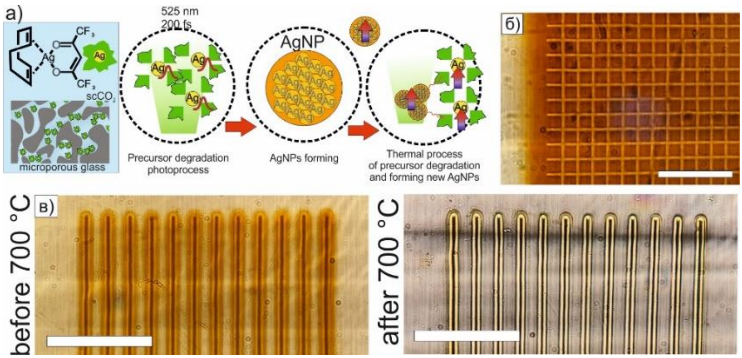


Рис. 1. Схема процесса (а) и фотографии линейных структур: линейные структуры при мощности 20 мВт (б), линейные структуры при мощности 80 мВт (в), бар – 50 мкм

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в части развития лазерных технологий.

Э.А. ИЗБАСАРОВА[1], А.Р. ГАЗИЗОВ[1,2], М.С. ПУДОВКИН[1]
[1]Казанский (Приволжский) федеральный университет
[2]Институт прикладных исследований АН Республики Татарстан, Казань

ВКЛАД ЭФФЕКТА ПАРСЕЛЛА В ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЮ НАНОЧАСТИЦ $Ce_{0.5}Y_{0.35}Tb_{0.15}F_3$ В УСЛОВИЯХ ПЛАЗМОННОГО УСИЛЕНИЯ

Представлены результаты исследования влияния эффекта Парселла на люминесценцию наночастиц $Ce_{0.5}Y_{0.35}Tb_{0.15}F_3$ в условиях плазмонного усиления. Двумя основными характеристиками, влияющими на ослабление или усиление люминесценции, являются расстояние между наночастицами и их конфигурация. Для регулировки расстояния между плазмонной и люминесцентной частицей используется слой ликера, покрывающий люминофор. Было обнаружено, что значительное гашение люминесценции вследствие резонансной передачи энергии характерно для малых расстояний между золотой наночастицей и люминофором. По мере увеличения расстояния между наночастицами гашение люминесценции снижается, достигая максимума усиления при оптимальном слое линкера. Увеличение количества золотых наночастиц способствует усилению эффекта Парселла, однако приводит к его ускоренному спаду с расстоянием.

E.A. IZBASAROVA[1], A.R. GAZIZOV[1,2], M.S. PUDOVKIN[1]
[1]Kazan (Volga Region) Federal University
[2]Intitute of Perspective Researches of Tatarstan Academy of Sciences, Kazan

CONTRIBUTION OF THE PURCELL EFFECT TO THE LUMINESCENCE OF $Ce_{0.5}Y_{0.35}Tb_{0.15}F_3$ NANOPARTICLES UNDER CONDITIONS OF PLASMON ENHANCEMENT

The results of a study of the influence of the Purcell effect on the luminescence of $Ce_{0.5}Y_{0.35}Tb_{0.15}F_3$ nanoparticles under plasmonic enhancement conditions are presented. The two main characteristics affecting the attenuation or enhancement of luminescence are the distance between the nanoparticles and their configuration. To adjust the distance between the plasmonic and luminescent particles, a liquor layer covering the luminophore is used. It was found that a significant attenuation of luminescence due to resonant energy transfer is characteristic of small distances between a gold nanoparticle and a luminophore. As the distance between the nanoparticles increases, the luminescence quenching decreases, reaching the maximum gain at the optimal linker layer. An increase in the number of gold nanoparticles enhances the Purcell effect, but leads to its accelerated decline with distance.

За последние несколько лет наночастицы с повышающим преобразованием, легированные лантаноидами (UCNP), стали многообещающими материалами благодаря их способности проявлять повышающее преобразование фотонов [1]. Кроме того, отсутствие фотообесцвечивания и мигания придают этим наночастицам особые свойства, которые делают их идеальными кандидатами для создания сенсоров и биологических анализаторов [2]. Плазмон-поляритоны являются одними из наиболее многообещающих кандидатов для оптических датчиков следующего поколения благодаря их способности поддерживать чрезвычайно ограниченные электромагнитные поля и обеспечивать сильную связь света и вещества. То есть металлические наноструктуры, поддерживающие плазмонный резонанс и размещённые в непосредственной близости от UCNP, являются отличным инструментом для настройки люминесценции повышающего преобразования путём усиления или гашения интенсивности люминесценции [3]. В процессе взаимодействия плазмонных наночастиц с люминофором возникают два конкурирующих эффекта: Фёрстеровское ближнеполевое взаимодействие и Парселловское усиление излучения в дальней зоне. При этом для усиления люминесценции важно избежать чрезмерного потребления энергии металлическими наночастицами, то есть преобладания эффекта Фёрстера.

В ходе данного исследования было обнаружено, что коэффициент усиления Парселла уменьшается с увеличением расстояния медленнее, чем коэффициент Фёрстера. Кроме того, формирование димеров из золотых наночастиц повышает эффективность усиления по Парселлу. Ещё одним важным результатом является то, что возможно управление интенсивностью люминесцентного излучения путём изменения толщины слоя линкера.

Данная работа финансировалась за счёт субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету по государственному заданию в сфере научной деятельности (ФЗСМ-2022-0021).

Список литературы

1. Qin X., Xu J., Wu Y., Liu X. // ACS Cent. Sci. 2019. V. 5. P. 29-42.

2. Mendez-Gonzalez D., Lopez-Cabarcos E., Rubio-Retama J., Laurenti, M. // Adv. Colloid Interface Sci. 2017. V. 249. P. 66-87.

3. Wu D.M., et al. // J. Phys. Chem. Lett. 2014. V. 5. No. 22. P. 4020-4031.

УДК 535(06)+004(06)

А.Е. РЫБАЛКА, Ю.А. БЕЗУС, В.В. РУМЯНЦЕВ, С.А. ФЕДОРОВ
Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С НЕИДЕАЛЬНОЙ 1D ФОТОННОЙ СТРУКТУРОЙ

Исследована зависимость дисперсионных характеристик квазичастичных возбуждений в неидеальной 1D-решётке микропор от концентрации дефектов структуры, связанных с вариацией положений микропор, как содержащих в одной из подрешёток квантовые точки, так и без них. Показано, что в результате наличия данных структурных дефектов в 1D двухподрешёточном массиве микропор можно добиться необходимого изменения энергетической структуры электромагнитных возбуждений и, следовательно, оптических свойств исследуемой системы, обусловленных перестройкой электромагнитного спектра

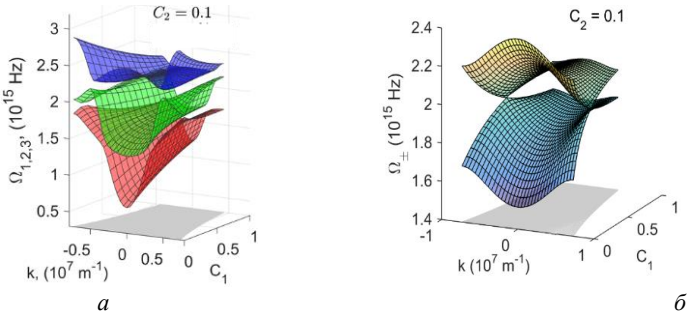
A.E. RYBALKA, J.A. BEZUS, V.V. RUMYANTSEV, S.A. FEDOROV
Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering

INTERACTION OF ELECTROMAGNETIC RADIATION WITH NON-IDEAL 1D PHOTON STRUCTURE

The dependence of the dispersion characteristics of quasi-particle excitations in a non-ideal 1D lattice of micropores on the concentration of structural defects associated with the variation of the positions of micropores, both containing quantum dots in one of the sublattices and without them, is investigated. It is shown that as a result of the presence of these structural defects in a 1D two-lattice array of micropores, it is possible to achieve the necessary change in the energy structure of electromagnetic excitations and, consequently, the optical properties of the system under study due to the restructuring of the electromagnetic spectrum.

Среди задач, которые приходится решать при создании новых наносистемных материалов, как источников когерентного излучения, и устройств, работающих на их основе, встаёт проблема изучения отдельного класса фотонных структур – поляритонных кристаллов, в которых реализуется сильная связь квантовых возмущений электронной подсистемы (экситонов) среды и оптического поля. В частности, примером таких структур может быть массив микропор – микрорезонаторов – привлекательных объектов для целей квантовой обработки информации

Интенсивно развивается фотоника несовершенных структур. Проведённые в рамках неидеальной фотоники исследования показали [1], что введением в исследуемый объект определённых дефектов можно добиться необходимых изменений энергетического спектра элементарных электромагнитных возбуждений и оптических его свойств, обусловленных перестройкой структуры. На основе общей теории [1] в данной работе исследованы особенности дисперсии квазичастичных возбуждений как поляритонных возбуждений в неидеальной двухподрешёточной 1D-решётке пор (микрорезонаторов), содержащих квантовые точки (КТ), так и экситоноподобных возбуждений в такой же решётке, но без КТ. Описание дисперсии квазичастичных возбуждений фотонной подсистемы (локализованного в микропоре электромагнитного поля) в пористой структуре без КТ весьма схожее с экситонами Френкеля в молекулярных кристаллах, поэтому этот тип элементарных возбуждений локализованного в микропорах электромагнитного поля назван экситоноподобным. Дисперсионная зависимость частот $\Omega(k)$ исследуемых коллективных возбуждений от концентрации C_1, C_2 структурных дефектов (вариации микропор по составу и по положениям в первой и второй подрешётках) в неидеальной решётке микрорезонаторов приведена на рис. 1.



а *б*

Рис. 1. Концентрационная зависимость дисперсии поляритонов $\Omega_{1,2,3}(k, C_1, C_2)$ (*а*), концентрационная зависимость дисперсии экситоноподобных возбуждений $\Omega_{\pm}(k, C_1, C_2)$ (б)

Список литературы

1. Rumyantsev V.V., Fedorov S.A., Gumennyk K.V., Paladyan Yu.A. // Physica B. 2019. V. 571 (15). P. 296-300.

УДК 535(06)+004(06)

О.К. МАЛЫШЕВ, И.Л. МАРТЫНОВ, А.А. ЧИСТЯКОВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

РАЗЛИЧНЫЕ РЕЖИМЫ ОПТИЧЕСКОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ПОЛИМЕРА MDMO-PPV В МИКРОРЕЗОНАТОРЕ ИЗ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ МОЛЕКУЛ НИТРОАРОМАТИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

В настоящей работе исследуются временные зависимости флуоресценции органического полимера с сопряжёнными связями MDMO-PPV, внедрённого в микрорезонатор из пористого кремния. Изучена динамика изменения амплитуды флуоресценции в непрерывном и импульсном режиме возбуждения под действием излучения полупроводникового лазера с длиной волны 450 нм. Показано, что существует характерное среднее значение интенсивности, при котором оптическое возбуждение не оказывает различимого влияния на скорость деградации флуоресценции полимера в нормальных условиях. Продемонстрировано, что использование импульсного режима возбуждения позволяет многократно увеличить отношение сигнал/шум для люминесцентного сигнала при сохранении постоянной средней интенсивности. Определена константа скорости тушения флуорисценции MDMO-PPV в микрорезонаторе из пористого кремния под действием насыщенных паров ТНТ.

O.K. MALYSHEV, I.L. MARTYNOV, A.A. CHISTYAKOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

VARIOUS MODES OF OPTICAL EXCITATION OF THE MDMO-PPV POLYMER IN A POROUS SILICON MICROCAVITY FOR DETECTING MOLECULES OF NITROAROMATIC COMPOUNDS

In this work, the fluorescence of a conjugated polymer MDMO-PPV embedded in a porous silicon microcavity is investigated. The dynamics of changes in the fluorescence amplitude in continuous and pulsed excitation modes under the action of radiation from a semiconductor laser with a wavelength of 450 nm has been studied. It is shown that there is a characteristic average intensity value at which optical excitation has no discernible effect on the rate of degradation of polymer fluorescence under normal conditions. It is demonstrated that the use of a pulsed excitation mode makes it possible to multiply the signal-to-noise ratio for a fluorescent signal while maintaining a constant average intensity. The rate constant of MDMO-PPV fluorescence quenching in a porous silicon microcavity under the action of saturated TNT vapors has been determined.

В настоящее время, активно развивается подход к детектированию нитроароматических соединений, основанный на тушении флуоресценции различных чувствительных люминофоров [1], среди которых можно выделить полимеры класса PVV. Чтобы повысить эффективность сбора сигнала люминесценции и увеличить эффективную рабочую площадь сенсора, чувствительный люминофор может быть внедрён в пористую матрицу, обладающую свойствами фотонного кристалла, например микрорезонатор (МР) из пористого кремния (ПК) [2, 3].

В данной работе исследована флуоресценция чувствительного полимера поли [2-метокси-5-(3,7-диметилоктилокси)-1,4-фенилен винилен] (MDMO-PPV), внедрённого в МР из ПК, в различных режимах оптического возбуждения. Исследуется как естественная деградация флуоресценции образца, так и её тушение при действии насыщенных паров ТНТ. Для возбуждения использовалось излучение полупроводникового лазера с длиной волны 450 нм. Установлено, что для MDMO-PPV в микрорезонаторе из пористого кремния при нормальных условиях, уменьшение средней интенсивности возбуждающего излучения, заметно снижает скорость фотодеградации полимера. Однако при интенсивности менее 100 мкВт/см^2, дальнейшее её снижение не оказывает заметного влияния на скорость падения амплитуды флуоресценции. Показано, что использование импульсного режима позволяет многократно увеличить отношение сигнал/шум для флуоресцентного сигнала при сохранении среднего значения интенсивности возбуждающего излучения. Проведён анализ динамики тушения полимера MDMO-PPV в микрорезонаторе из пористого кремния под действием паров ТНТ с концентрацией близкой к давлению насыщенных паров. Показано, что экспериментальная кривая тушения хорошо приближается мультиэкспоненциальной зависимостью. При этом характерная величина падения амплитуды флуоресцентного сигнала составляет 40 % за 10 с. при малых отклонениях от исходного значения амплитуды, кривая тушения может быть приближена линейной функций, с константой скорости тушения $5 \cdot 10^{-2}$ 1/с.

Список литературы

1. Sun X., Wang Y., Lei Y. // Chem. Soc. Rev. Royal Society of Chemistry. 2015. V. 44. P. 8019-8061.

2. Levitsky I.A., et al. // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 90. P. 1-4.

3. Osipov E.V., et al. // Opt. Spectrosc. 2017. V. 122. P. 74-78.

К.А. ПОРТНОВА[1], А.А. ШЕЛЕМАНОВ[1], С.К. ЕВСТРОПЬЕВ[1,2,3]
[1]Университет ИТМО, Санкт-Петербург
[2]Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, Санкт-Петербург
[3]Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)

ФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ ПОРИСТЫХ НАНОСТРУКТУР ZnO-MgO С ДОБАВЛЕНИЕМ Cu(Mn) ДЛЯ ИНТЕНСИВНОЙ ФОТОГЕНЕРАЦИИ СИНГЛЕНТНОГО КИСЛОРОДА, ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИХ И АНТИБАКТЕРИАЛЬНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ

Были исследованы пористые композиты Cu(Mn):ZnO-MgO, синтезированные полимерно-солевым методом. Изучены кристаллическая структура, морфология, спектральные свойства, способность к фотогенерации химически активного синглетного кислорода при внешнем видимом облучении, фотокаталитические и антибактериальные свойства пористых композитов.

K.A. PORTNOVA[1], A.A. SHELEMANOV[1], S.K. EVSTROPIEV[1,2,3]
[1]ITMO University, Saint-Petersburg
[2]S.I. Vavilov State Optical Institute, Saint-Petersburg
[3]Saint-Petersburg State Institute of Technology (Technical University)

STRUCTURAL ENGINEERING OF POROUS Cu(Mn)-DOPED ZnO-MgO NANOSTRUCTURES FOR THE INTENSIVE SINGLET OXYGEN PHOTOGENERATION, PHOTOCATALYTIC AND ANTIBACTERIAL APPLICATIONS

Porous Cu(Mn):ZnO-MgO composites synthesized by the facile polymer-salt method and were characterized. The crystal structure, morphology, spectral properties, the ability of the photogeneration of chemically active singlet oxygen under external visible irradiation, photocatalytic and antibacterial properties of porous composites were studied.

Экологические проблемы стимулируют изучение и разработку новых фотокаталитических и бактерицидных материалов. Оксидные материалы на основе ZnO являются высокоэффективными фотокатализаторами и проявляют антибактериальную активность [1]. При использовании полимерно-солевого метода синтеза можно получать композиты с большой удельной поверхностью [2]. Они обладают пористой структурой и размерами кристаллов менее 20 нм. Для усиления фотокаталитической

активности и повышения антибактериальных свойств используются различные добавки, например (Cu, Fe, Mn). Эти добавки уменьшают рекомбинацию фотогенерированных электронно-дырочных пар и размеры кристаллов в полученных нанокомпозитах [3]. Основным механизмом фотокатализа и антибактериальной активности материала является образование активных форм кислорода на поверхности оксида металла и последующее окисление ими органических соединений. Поэтому материалы с высокой удельной поверхностью демонстрируют повышенные фотокаталитические и бактерицидные свойства. Адсорбция органических соединений на поверхности фотокатализатора рассматривается как предварительная стадия их фотокаталитического разложения. Было обнаружено, что адсорбция протекает особенно эффективно на материалах с высокой удельной поверхностью, что дополнительно улучшает их фотокаталитические характеристики.

Целью данной работы является изучение пористых фотоактивных композитов ZnO-MgO с добавлением Mn и Cu, синтезированных полимерно-солевым методом синтеза и характеристика их кристаллической структуры, морфологии, значений ширины запрещённой зоны, способности к фотогенерации химически активного синглетного кислорода и фотокаталитической и бактерицидной активности.

В ходе работы исследовались композиты Cu(Mn):ZnO-MgO, синтезированные полимерно-солевым методом. Морфология полученных материалов была изучена методом СЭМ-анализа. Кристаллическая структура композитов изучалась рентгеноструктурным методом. Спектры диффузионного отражения измерялись с помощью спектрофотометра. Для изучения фотокаталитических свойств на кюветы с порошком и раствором органического красителя Chicago Sky Blue воздействовали излучением ртутной лампы высокого давления. В ходе экспериментов содержание CSB в растворах определяли путём периодических измерений их спектров поглощения с использованием спектрофотометра. Для оценки антибактериальной активности синтезированных оксидных материалов был использован метод, описанный в [3]. Антибактериальный эффект изучали путём измерения размера ингибированной области, которая образуется на поверхности, содержащей бактерии.

Список литературы

1. Gavrilova M., et al. // Ceramics. 2023. V. 6. P. 1667-1681.

2. Enhanced singlet oxygen photogeneration by bactericidal ZnO-MgO-Ag nanocomposites // URL: https://colab.ws/articles/10.1016/j.matchemphys.2021.125204 (accessed: 21.11.2023).

3. Evstropiev S.K., et al. // Ceramics International. 2018. V. 44. No. 8. P. 9091-9096.

В.С. МАКИН, Р.С. МАКИН[1]
Научно-проектный центр Оптоэлектронных комплексов наблюдения – филиал АО «Корпорация «Комета», Санкт-Петербург
[1]Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ОПТИЧЕСКИЙ СКИРМИОН КАК УСТОЙЧИВАЯ КВАНТОВАЯ ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С КОНДЕНСИРОВАННЫМИ СРЕДАМИ

Предложена концепция (мета)устойчивой квантовой топологической структуры, возникающей при взаимодействии лазерного излучения с конденсированной средой – оптического скирмиона (ОС). Показано квантование характерного пространственного масштаба ОС на основе фундаментальных закономерностей нелинейных динамических систем. Приведены экспериментальные реализации для наносекундных и ультракоротких длительностей на материалах с существенно различными физическими свойствами.

V.S. MAKIN, R.S. MAKIN[1]
Scientific and Design Center for Optoelectronic Observation Complexes – Branch of JSC "Kometa Corporation", Saint-Petersburg
[1]National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

OPTICAL SKYRMION AS (META)STABLE QUANTUM TOPOLOGICAL STRUCTURE UNDER LASER RADIATION INTERACTION WITH CONDENSED MEDIA

The model of optical skyrmion (OS) – as (meta)stable quantum topological structure under laser radiation interaction with condensed media is proposed. The quantum features of OS spatial scale on the base of Sharkovsky order sequence are shown. Experimental realizations for nanosecond and ultrafast durations on materials with different physical properties are suggested.

Проведён анализ последних экспериментальных работ по взаимодействию лазерного излучения (ЛИ) с конденсированными средами (КС), включая металлы и полупроводники, с образованием структур шестигональной симметрии [1 - 3]. Предложена концепция образования топологического квантового объекта – оптического скирмиона (ОС) [4, 5] – результат взаимодействия ЛИ с КС. ОС – кристаллографическая

разновидность топологического дефекта – (мета)устойчивый объект, что следует из фундаментального свойства запутанности [6]. ОС с пространственными масштабами $S \sim 64\lambda/n\zeta$ и $\sim 96\lambda/n\zeta$ и существенно субволновым $3\lambda/64\zeta$ обнаружены на поверхности кремния [7, 8] и чёрного фосфора [9]; наблюдалась конкуренция наноструктур, линейных решёток и ОС [10], ОС и меронов [11]. Анализ показал, что супра- (суб-)волновые структуры при воздействии ЛИ образуются на поверхностях КС в соответствии с нелинейной математической моделью (НММ) в рамках универсальной поляритонной модели (УПМ) [1, 4] и концепции топологического квантового объекта [12] – ОС. Периоды структур, S ОС изменяются кратно длине волны λ ЛИ и описываются последовательностью порядка Шарковского (Ш) [1], в том числе в силу их инвариантности относительно идентифицированных топологических трансформаций. Предложена нелинейная модель описания квантовых топологических структур на основе операторного представления, где в качестве собственных элементов (значений) использованы элементы порядка (Ш), являющиеся наблюдаемыми. Единственность и сходимость конструктивных операторных представлений в несепарабельном пространстве, калиброванном по мере запутанности, следует из теоремы (Ш). В нелинейных процессах также наблюдаются топологические трансформации (мероны, скирмионы, массивы острийных структур, структуры типа энионов) – морфогенез для обширных семейств КС под воздействием мощного ЛИ. Полученные результаты могут быть использованы для прогнозированного формирования микро- и наноструктур на поверхностях и в объёме конденсированных сред, в том числе для придания им новых функциональных свойств.

Список литературы

1. Макин В.С., Макин Р.С. // Оптика и спектроскопия. 2020. Т. 128. № 2. С. 272-276.
2. Romano J.M., Garcia-Giron A., et al. // Appl. Surf. Sci. 2018. V. 440. P. 162-169.
3. Макин В.С., Макин Р.С. // Письма в ЖТФ. 2023. Т. 49. Вып. 21. С. 33-37.
4. Макин В.С., Макин Р.С. // XII Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сбор. науч. тр. М.: НИЯУ МИФИ, 2023. С. 92-93.
5. Tsesses S., Ostrovsky E., et al. // Science. 2018. V. 361. No. 6406. P. 993-996.
6. Shen Y., Rosales-Gusman C. // Laser Photonics Rev. 2022. V. 16. P. 2100533.
7. Saleh A.A., Rudenko A., et al. // Nanoscale. 2020. V. 12. P. 6609-6616.
8. Chen X.Y., Lim J., et al. // Appl. Phys. A. 2009. V. 94. P. 649-656.
9. Kim Y.J., Lee Y., Choi W., et al. // Nano Letters. 2023. V. 23. P. 3645-3652.
10. Ahmeed K.M.T., Grambow C., et al. // Micromachines. 2014. V. 5. P. 1219-1253.
11. Durbach S., Hampp N. Applied Surface Science. 2021. V. 556. P. 149803.
12. Dai Y., Zhow Z., et al. // Nature. 2020. V. 588. P. 616-619.

УДК 535(06)+004(06)

А.А. ДОЦЕНКО, В.Б. НОВИКОВ, А.П. ЛЕОНТЬЕВ,
К.С. НАПОЛЬСКИЙ, Т.В. МУРЗИНА
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ДИНАМИКА ЧИРПИРОВАННЫХ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ В ENZ-МЕТАМАТЕРИАЛАХ

Экспериментально исследовано распространение фемтосекундных лазерных импульсов в Epsilon-Near-Zero (ENZ) метаматериалах на основе плазмонных наностержней. Обнаружено, что чирпирование падающих импульсов позволяет управлять и усиливать эффекты быстрого и медленного света в таких структурах.

A.A. DOTSENKO, V.B. NOVIKOV, A.P. LEONTIEV,
K.S. NAPOLSKII, T.V. MURZINA
Lomonosov Moscow State University

DYNAMICS OF CHIRPED ULTRASHORT LASER PULSES IN ENZ METAMATERIALS

The propagation of femtosecond laser pulses in Epsilon-Near-Zero (ENZ) metamaterials based on plasmonic nanorods was experimentally investigated. We found that chirping of incident pulses allows to control and enhance the effects of fast and slow light in these structures.

В нанофотонике большое внимание уделяется гиперболическим метаматериалам (ГММ), представляющим собой анизотропные композитные наноструктурированные среды, в которых главные компоненты тензора эффективной диэлектрической проницаемости ε имеют противоположные знаки [1]. Особый интерес в оптике ГММ вызывает ENZ спектральная область, в которой действительная часть одной из этих величин обращается в ноль и меняет свой знак [2]. Малое значение ε в ENZ-режиме использовалось для управления динамикой лазерных импульсов в ГММ [3, 4]. Целью данной работы является экспериментальное и теоретическое исследование эффектов быстрого и медленного света при распространении чирпированных фемтосекундных лазерных импульсов в ГММ в ENZ-режиме.

Исследованная ГММ-структура была образована массивом серебряных наностержней длиной около 1000 нм, выращенных в матрице анодного оксида алюминия (АОА), и проявляла ENZ-режим вблизи длины волны излучения $\lambda \approx 820$ нм (рис. 1). В этой спектральной области наблюдался

набор локальных минимумов в частотно-угловой (λ-θ) зависимости коэффициента пропускания света ГММ. Выполненное численное моделирование прохождения излучения через структуру показало, что в этих особых точках комплексный коэффициент пропускания структуры имел фазовую сингулярность. Именно эта особенность была использована в работе для достижения эффектов быстрого и медленного света.

Измерения групповой задержки лазерных импульсов в ГММ-структуре проводились с использованием нелинейно-оптического кросс-корреляционного метода, источником излучения служил титан-сапфировый лазер, генерирующий импульсы длительностью 60 фс с центральной длиной волны, перестраиваемой в диапазоне 750 - 850 нм.

Обнаружены эффекты быстрого и медленного света, заключающиеся в опережающем движении или, напротив, значительном замедлении импульсов в ГММ по сравнению с их распространением в воздухе. Установлено, что переключение между этими эффектами достигается изменением угла падения света, что отражено на λ-θ спектре задержки τ, где отрицательные и положительные величины отвечают эффектам быстрого и медленного света соответственно (рис. 2*а*).

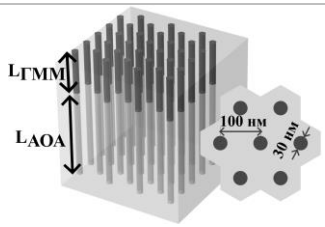


Рис. 1. Схема структуры ГММ

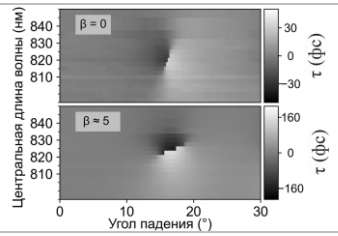


Рис. 2. λ-θ зависимости задержки τ лазерных импульсов для β = 0 (*а*) и β = 5 (*б*)

Показано, что чирпирование падающего лазерного импульса, характеризуемое безразмерным параметром β, ведёт к усилению этих эффектов, а также повороту их резонансной зависимости τ на λ-θ карте задержки импульсов (рис. 2*б*). При достаточно сильном чирпировании лазерного импульса становится возможным переключение между режимами быстрого и медленного света путём варьирования центральной длины волны импульса при фиксированном угле падения излучения.

Список литературы

1. Ferrari L., et al. // Progress in Quantum Electronics. 2015. V. 40. P. 1-40.
2. Kolmychek I.A., et al. // JETP Letters. 2021. V. 114 (11). P. 653-664.
3. Novikov V.B., et al. // Physical Review B. 2022. V. 106 (16). P. 165415.
4. Stefaniuk T., et al. // Advanced Materials. 2023. V. 35 (34). P. 2107023.

УДК 535(06)+004(06)

А.А. БУРЦЕВ, В.В. ИОНИН, А.В. КИСЕЛЕВ, Н.Н. ЕЛИСЕЕВ,
В.А. МИХАЛЕВСКИЙ, А.А. НЕВЗОРОВ, А.А. ЛОТИН
Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Шатура

МОДУЛЯЦИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНОГО ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В работе представлены исследования оптического переключения электрической проводимости и сопротивления тонких плёнок халькогенидных материалов GeTe и GST_{225}. Анализируются особенности кристаллизации для импульсов разной длительности. Показано влияние морфологии на динамику электрофизических свойств.

A.A. BURTSEV, V.V. IONIN, A.V. KISELEV, N.N. ELISEEV,
V.A. MIKHALEVSKY, A.A. NEVZOROV, A.A. LOTIN
Institute on Laser and Information Technologies – branch of FSRC «Crystallography and Photonics» of the RAS, Shatura

ELECTROPHYSICAL PROPERTIES MODULATION OF CHALCOGENIDE MATERIALS BY EXPOSURE TO PULSED OPTICAL RADIATION

This paper presents studies on the optical switching of electrical conductivity and resistance of thin films of the chalcogenide materials GeTe and GST_{225}. The crystallization characteristics for pulses of different durations are analyzed. The influence of the morphology on the dynamics of the electrophysical properties is shown.

Резистор памяти или мемристор (четвёртый фундаментальный компонент микроэлектроники) успешно реализован и получил большое развитие в наноразмерных архитектурах (на основе тонких плёнок и кластеров наночастиц), в которых процессы переноса зарядов (электронов или ионов) управляются внешним напряжением смещения [1]. Способность управляемо модулировать электрические сигналы и сохранять состояния памяти, сравнимые с синаптической активностью в биологических клетках, открыла новые возможности для реконфигурируемых интегральных схем [2].

Халькогенидные фазоизменяемые материалы GeTe и GST_{225} известны своими применениями в технологиях перезаписываемых оптических

дисков и модулей электронной фазовой памяти [3]. Обычно фазовый переход осуществляется при помощи наносекундного и микросекундного лазерного нагрева: аморфный материал кристаллизуется при нагреве от температуры кристаллизации до температуры плавления, а лазерный импульс высокой плотности расплавляет кристаллический материал до его аморфной фазы (необходимо обеспечить высокую скорость охлаждения – до 10^{11} К/с) [4]. Быстрая скорость фазового перехода позволяет использовать халькогенидные материалы в перестраиваемых и реконфигурируемых устройствах. Ячейка на основе тонких плёнок халькогенидов может хранить несколько состояний, которые соответствуют разному соотношению аморфной и кристаллической фаз [5]. Ячейки многоуровневых состояний обладают рядом принципиальных свойств, таких как режим накопления энергии, пороговое значение энергии перехода и нелинейное изменение физических характеристик, что позволяет рассматривать их работу как аналог биологического нейрона [6].

Целью настоящей работы является исследование обратимых фазовых переходов (в том числе и определение их времен) в тонких плёнках GeTe и GST_{225}, индуцированных импульсным лазерным излучением лазеров различной длительности. Динамические характеристики изменения сопротивления образцов измерялись в схеме деления напряжения с использованием опорного сопротивления и постоянного напряжения [7]. Продемонстрированы особенности кристаллизации при нано- и фемтосекундной импульсах, их влияние на модуляцию электрофизических свойств. Результаты позволяют рассматривать халькогенидные материалы как многообещающую платформу для создания интегрированных гибридных оптоэлектронных мемристивных устройств [8].

Список литературы

1. Strukov D.B., et al. // Nature. 2008. V. 453. No. 7191. P. 80-83.
2. Li Y., et al. // Journal of Physics D: Applied Physics. 2018. V. 51. No. 50. P. 503002.
3. Zhang W., Mazzarello R., Wuttig M., et al. // Nat. Rev. Mater. 2019. V. 4. P. 150-168.
4. Raoux S. //Annual Review of Materials Research. 2009. V. 39. P. 25-48.
5. Papandreou N., et al. // 2010 17th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems. 2010. P. 1017-1020.
6. Ovshinsky S.R. // Jpn. J. Appl. Phys. 2004. V. 43. P. 4695.
7. Nevzorov A.A., et al. // Optics & Laser Technology. 2023. V. 157. P. 108773.
8. Youngblood N., et al. // Nature Photonics. 2023. V. 17. P. 561-572.

М.А. МУРЗАКОВ[1], Н.Н. ЕВТИХИЕВ[1,2], Н.В. ГРЕЗЕВ[1],
Д.М. КАТАЕВ[1]
[1]Научно-техническое объединение «ИРЭ-Полюс» , Фрязино
[2]Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ФОРМИРОВАНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТАЛЛА И СТЕКЛА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПИКОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Приведены результаты экспериментов по формированию сварных соединений «металл-стекло» при воздействии пикосекундных импульсов. При взаимодействии лазерного излучения с металлом и стеклом формируется прочная механическая связь на границе раздела разнородных материалов. Показано, что формирование сварных швов происходит при энергиях импульса 30 мкДж, при скоростях обработки свыше 100 мм/с и длительности импульсов 1 - 3 пс. Проведены испытания сварных соединений на термическое циклирование, механическое растяжение, а также определён элементный состав на границе разлома сварных швов.

M.A. MURZAKOV[1], N.N. EVTHIKHIEV[1,2], N.V. GREZEV[1],
D.M. KATAEV[1]
[1]NTO «IRE-Polus», Fryazino
[2]National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

FORMATION OF WELDED JOINTS OF METAL AND GLASS UNDER INFLUENCE OF PICOSECONDS PULSES

The results of experiments on the formation of metal-glass welded joints under the influence of picosecond pulses are presented. When laser radiation interacts with metal and glass, a strong mechanical bond is formed at the interface between dissimilar materials. It is shown that the formation of welds occurs at pulse energies of 30 μJ, at processing speeds of over 100 mm/s and pulse durations of 1 - 3 ps. Welded joints were tested for thermal cycling and mechanical tension, and the elemental composition at the fracture boundary of the welds was determined.

При воздействии лазерных импульсов длительностью до 10 пс [1] на прозрачные материалы, такие как стекло, возникают нелинейные эффекты: многофотонное поглощение лазерного излучения и лавинообразная ионизация [2]. Не маловажным параметром при сварке прозрачных стёкол является фокусирование лазерного излучения [3]. Однако, процесс лазерной сварки соединений «металл-стекло» до конца не изучен.

Целью работы является экспериментальное исследование процесса формирования сварных соединений «металл-стекло», а также проведение испытаний полученных сварных швов. В работе использован волоконный пикосекундный лазер ($E_{им}$ = 100 мкДж, 1030 нм, 1 - 3 пс). В качестве фокусирующего объектива использован сканер с линзой плоского поля со следующими параметрами NA = 0.05 (f = 100 мм) и полем обработки 100 х 100 мм.

При проведении экспериментов выявлено, что процесс формирования сварного соединения на границе «металл-стекло» образуется на скоростях свыше 100 мм/с. Также выявлено, что при энергии свыше 30 мкДж происходит соединение двух разнородных материалов. Успешно проведены испытания сварных швов на термическое циклирования в диапазоне температур -10 до +60 °С, также проведены механические испытания сварных соединений и определён элементный состав на границе разлома образцов. При проведении сканирующей электронной микроскопии обнаружены частицы стекла, которые не разрушились после механического разлома на границе раздела «металл-стекло».

Список литературы

1. Vogel A., Venugopala V., et al. // Chem. Rev. 2003. V. 103. P. 577-644.
2. Miyamoto I., et al. // Woodhead Publishing Limited. 2013. P. 301-331.
3. Murzakov M.A., Evtikhiev N.N., et al. // Laser Phys. Lett. 2023. V. 20. P. 085603.

УДК 535(06)+004(06)

К.А. ЕГОРОВА, К.А. РОЗАНОВ, А.Д. СИДОРОВА,
Ф.А. ГОРЕНСКИЙ, Д.А. СИНЕВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ФОРМИРОВАНИЯ ТВЁРДОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ НА ТИТАНЕ ЗА СЧЁТ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ПОД СЛОЕМ УГЛЕРОДОСОДЕРЖАЩИХ ВЕЩЕСТВ

В настоящей работе рассматриваются особенности лазерного метода термоупрочнения поверхностных слоёв титана с применением присадочного материала (графена). Оценка твёрдости образцов выполнялась по методу Виккерса. Удалось достичь значений твёрдости поверхностного слоя микроструктур порядка 450 HV, что почти в два раза больше исходного значения.

X.A. EGOROVA, K.A. ROZANOV, A.D. SIDOROVA,
F.A. GORENSKII, D.A. SINEV
ITMO University, Saint-Petersburg

IMPROVEMENT OF A METHOD FOR FORMING A HARDNESS SURFACE LAYER ON TITANIUM BY LASER TREATMENT UNDER A LAYER OF CARBON-CONTAINING SUBSTANCES

The present work deals with the peculiarities of the laser method of thermal strengthening of titanium surface layers with the use of filler material (graphene). The hardness of the samples was evaluated by the Vickers method. It was possible to achieve hardness values of the surface layer of microstructures of about 450 HV, which is almost 2 times higher than the original value.

Функционализация поверхностного слоя металла, т. е. придание ему различных свойств, может быть достигнута методами изменения физико-химических, механических и структурно-фазовых параметров материала. В настоящее время применяются различные методики для изменения характеристик поверхностного слоя изделия [1, 2].

Например, титан нередко используется в промышленности благодаря его малому весу при заданном уровне прочности и устойчивости к высоким температурам, коррозионной стойкости и биосовместимости. Но его использование ограничено из-за реакционной способности в условиях высоких температур во время механической обработки или быстрого

износа. Для улучшения последнего параметра необходимо повышать твёрдость, так как твёрдость влияет на значения износостойкости. Однако для элементов режущих инструментов (таких как шестеренки, поршни, сверла, фрезы, ножи, ножниц и пр.) необходимо сочетание высокой поверхностной твёрдости и прочности, и мягкости структуры сердцевины материала, из которого они изготовлены. Достичь баланса перечисленных свойств возможно посредством лазерной обработки с целью формирования поверхностных микроструктур. Изменяя и наращивая дополнительные поверхностные структуры, мы не затрагиваем весь материал. Ранее нами был предложен метод ассистированной лазерной обработки с графитом [3] с предварительным окислением поверхности. Данный метод позволил получить значения твёрдости до 3200 HV.

Однако проблемой данного метода является использование порошкообразного графита, так как даже применение специального шаблона для контроля толщины слоя порошка не исключает возможности появления воздушных карманов, что влияет на итоговое качество наносимого слоя. Поиск решения проблемы привёл к идее заменить графитовый порошок на предварительную лазерную обработку полиимида источником с длиной волны 10,6 мкм с последующим образованием лазерно-индуцированного графена [4]. Толщину получаемого слоя можно контролировать изменением параметров лазерного излучения.

В данной работе изучена задача экспериментального исследования зависимости твёрдости поверхностного слоя титана при структурировании под слоем графена от параметров лазерного воздействия на полимер.

Работы выполнены при финансовой поддержке научной подготовки бакалавров, магистрантов и аспирантов в рамках выполнения научно-исследовательских работ на базе Физико-технического мегафакультета Университета ИТМО и при поддержке программы «Приоритет 2030».

Список литературы

1. Chi J., Cai Z., Zhang H., et al. Combining manufacturing of titanium alloy through direct energy deposition and laser shock peening process // Materials and Design. 2021. V. 203. P. 109626.

2. Saleh A.F., Abboud J.H., Benyounis K.Y. Surface carburizing of Ti-6Al-4V alloy by laser melting //Optics and Lasers in Engineering. 2010. V. 48. P. 257-267.

3. Егорова К.А., Розанов К.А., Киян А.И., Синев Д.А. Управление твердостью поверхностного слоя титановых образцов за счет аддитивной лазерной обработки // Photonics Russia, 2023.

4. Lin J., et al. Laser-induced porous graphene films from commercial polymers // Nature communications. 2014. V. 5. No. 1. P. 5714.

А.К. ВОРОБЬЕВ[1,2], Н.А. КАПРИДОВ[1,2], Д.В. МОРОЗОВ[1,2],
А.Е. ШИТИКОВ[1], Д.А. ЧЕРМОШЕНЦЕВ[1,2,3], И.А. БИЛЕНКО[1,4]
[1]Российский квантовый центр, Сколково
[2]Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет), Долгопрудный
[3]Сколковский институт науки и технологий
[4]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ГЕНЕРАЦИЯ ЧАСТОТНЫХ ГРЕБЁНОК В ОПТИЧЕСКИХ МИКРОРЕЗОНАТОРАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУХЧАСТОТНОЙ НАКАЧКИ

Экспериментально исследуется генерация оптических частотных гребёнок в интегральных кольцевых микрорезонаторах из нитрида кремния Si_3N_4 при двухчастотной накачке. Показаны оптические частотные гребёнки как при нормальной, так и при аномальной дисперсии групповых скоростей (ДГС). Выявлено, что для близких параметров излучения накачки в области нормальной ДГС, в отличие от аномальной, возбуждаемые гребёнки имеют низкий уровень фазовых шумов и существенно большую эффективность конверсии энергии.

A.K. VOROBYEV[1,2], N.A. KAPRIDOV[1,2], D.V. MOROZOV[1,2],
A.E. SHITIKOV[1], D.A. CHERMOSHENTSEV[1,2,3], I.A. BILENKO[1,4]
[1]Russian Quantum Center, Skolkovo
[2]Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny
[3]Skolkovo Institute of Physics and Technology
[4]Lomonosov Moscow State University

FREQUECNY COMBS GENERATION IN DUAL-PUMPED OPTICAL MICRORESONATORS

We experimentally study the frequency combs generation in the dual-pumped integrated microring Si_3N_4 resonators with normal and anomalous group velocity dispersion (GVD). The frequency combs are analyzed in optical and radiofrequency domains. For close pump parameters in the region of normal GVD, the excited combs have a lower phase noise level as well as higher energy conversion efficiency.

Развитие технологий изготовления фотонных интегральных схем из нитрида кремния позволяет создавать микрорезонаторы на их основе, сочетающие в себе высокую керровскую нелинейность и высокую оптическую добротность, что приводит к чрезвычайно низкому порогу нелинейных эффектов в таких структурах, в частности, позволяет

возбуждать оптические частотные гребёнки. Данная работа посвящена исследованию возбуждения керровских частотных гребёнок в таких микрорезонаторах для различных величин дисперсии групповой скорости (ДГС) β_2, как нормальной $\beta_2 > 0$, так и аномальной $\beta_2 < 0$.

Экспериментально установлено, что в резонаторах с аномальной ДГС происходит генерация частотных гребёнок, формирование которых сопровождается радиочастотным шумом на околонулевой частоте, что указывает на некогерентный режим генерации (вложенный рисунок на рис. 1*б*). На рис. 1*б* приведён спектр частотной гребёнки, возбуждённой в микрорезонаторе с $\beta_2 = -140$ пс^2/км и добротностью $Q = 8 \times 10^5$ при мощности накачки 80 мВт. Величина конверсии энергии накачки в спектр частотной гребёнки составила 5 %.

В резонаторах с нормальной ДГС была достигнута генерация когерентных частотных гребёнок, обладающих более высокой конверсией энергии в спектр частотной гребёнки. На рис. 1*а* приведён спектр частотной гребёнки, возбуждённой двухчастотной накачкой в микрорезонаторе с $\beta_2 = 27$ пс^2/км и $Q = 3 \times 10^5$ при мощности накачки 120 мВт. Величина конверсии составила 15 %.

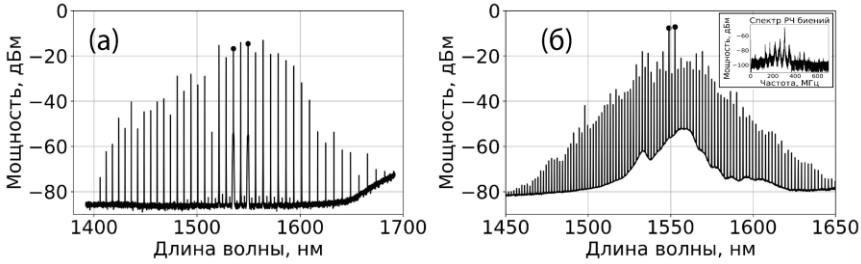


Рис. 1. Оптические частотные гребёнки, возбуждённые с помощью двухчастотной накачки в резонаторе с нормальной ДГС (*а*), с аномальной ДГС (*б*), спектральные компоненты накачки отмечены маркерами

Список литературы

1. Kippenberg T.J., et al. // Science. 2018.V. 361. P. 6402.

УДК 535(06)+004(06)

Д.В. МОРОЗОВ[1,2], А.К. ВОРОБЬЕВ[1,2], Н.Ю. ДМИТРИЕВ[1,2],
Д.А. ЧЕРМОШЕНЦЕВ[1,2,3], И.А. БИЛЕНКО[1,4]
[1]Российский квантовый центр, Сколково
[2]Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет), Долгопрудный
[3]Сколковский институт науки и технологий
[4]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ИЗМЕРЕНИЕ ДИСПЕРСИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ДОБРОТНОСТЕЙ ОПТИЧЕСКИХ МИКРОРЕЗОНАТОРОВ

Проводится измерение дисперсионных характеристик и добротностей оптических интегральных кольцевых микрорезонаторов из нитрида кремния Si_3N_4, обладающих различными геометрическими параметрами.

D.V. MOROZOV[1,2], A.K. VOROBYEV[1,2], N.Yu. DMITRIEV[1.2],
D.A. CHERMOSHENTSEV[1,2,3], I.A. BILENKO[1,4]
[1]Russian Quantum Center, Skolkovo
[2]Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny
[3]Skolkovo Institute of Physics and Technology
[4]Lomonosov Moscow State University

MEASUREMENT OF DISPERSION CHARACTERISTICS AND QUALITY FACTORS OF OPTICAL MICRORESONATORS

We perform an experimental measurement of dispersion and quality factors of optical integrated Si_3N_4 microring resonators with different geometries.

Закон дисперсии и добротность являются ключевыми параметрами оптических микрорезонаторов. Определение данных параметров основано на измерении спектра пропускания микрорезонатора с использованием эталонной частотной линейки [1]. В данной работе в качестве вспомогательной частотной линейки используется спектр эталонного высокодобротного кольцевого волоконного резонатора.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1*а*. Источником излучения служит лазер, перестраиваемый в диапазоне 1510 - 1630 нм. В процессе частотного сканирования лазерного источника происходит одновременная регистрация спектров пропускания исследуемого и эталонного резонаторов с помощью осциллографа.

Фрагменты сигналов приведены на вложенном рисунке в рис. 1*б*. На основе измеренного спектра пропускания эталонного резонатора определяются резонансные частоты f_m исследуемого микрорезонатора. Зависимость f_m от номера моды m можно представить в виде ряда:

$$f_m = f_0 + \frac{D_1}{2\pi} m + \frac{1}{2}\frac{D_2}{2\pi} m^2 + \ldots = f_0 + \frac{D_1}{2\pi} m + \frac{D_{\text{int}}(m)}{2\pi},$$

где $D_1/2\pi$ – область свободной дисперсии микрорезонатора на частоте f_0; D_k, $k \geq 2$ – дисперсионные коэффициенты высших порядков; $D_{int}(m) = \Sigma_{k \geq 2}(1/k!)D_k m^k$. На рис. 1*б* приведена измеренная зависимость $D_{int}(m)$ для интегрального кольцевого резонатора из нитрида кремния Si_3N_4 с геометрическими параметрами: радиус 1.512 мм, профиль волновода прямоугольный, ширина 41.9 мкм, высота 0.8 мкм. Из аппроксимации кривой получены следующие значения дисперсионных коэффициентов: $D_1/2\pi$ = 14.986 ГГц, $D_2/2\pi$ = 0.019 МГц.

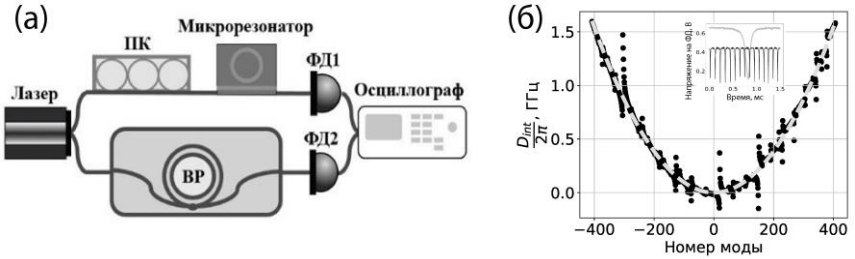


Рис. 1. Экспериментальная установка: ПК – контроллер поляризации, ФД – фотодетектор, ВР – волоконный резонатор (*а*), дисперсионная кривая (*б*)

Список литературы

1. Fujii S., Tanabe T., et al. // Nanophotonics. 2020. V. 9. No. 5. P. 1087-1104.

УДК 535(06)+004(06)

А.Д. ПАТОЛЯТОВ[1], Д.А. ЩЕРБАКОВ[1], Д.А. КОЛЫМАГИН[1], А.Г. ВИТУХНОВСКИЙ[1,2]

[1]Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный
[2]Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

ПРЕЛОМЛЯЮЩИЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ ЛИНЗЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ МЕТОДОМ ДВУХФОТОННОЙ ЛАЗЕРНОЙ ЛИТОГРАФИИ

Рассмотрена технология для изготовления из полимеров преломляющих элементов рентгеновского диапазона – метод двухфотонной лазерной литографии. Были напечатаны две серии преломляющих микролинз на основе нескольких новых фоторезистов. Исследована морфология полученных структур. Были предложены оптимальные параметры печати для минимизации искажения морфологии полученных таким образом микролинз.

A.D. PATOLYATOV[1], D.A. SHCHERBAKOV[1], D.A. KOLYMAGIN[1], A.G. VITUKHNOVSKY[1,2]

[1]Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny
[2]Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

REFRACTIVE X-RAY LENSES MADE BY THE TWO-PHOTON LASER LITHOGRAPHY METHOD

The technology for the manufacture of X–ray refractive elements from polymers is considered - the method of two-photon laser lithography. Two series of refractive microlenses based on several new photoresists were printed. The morphology of the obtained structures is investigated. Optimal printing parameters were proposed to minimize distortion of the morphology of the microlenses obtained in this way.

Рентгеновское излучение способно проникать через непрозрачные для обычного света вещества, что находит отражение во многих сферах жизни. Однако управлять им трудно ввиду слабого взаимодействия с веществом. Поэтому оптические приборы для преломления рентгеновских лучей имеют размеры порядка микрометра и требуют специальных способов изготовления [1].

Целью работы является создание рентгеновских преломляющих линз методом двухфотонной лазерной литографии (ДЛЛ) на основе

стандартных и новых резистов с определённой морфологией поверхности и поиск оптимальных параметров печати для линз из новых резистов.

На рис. 1 представлена схема процесса печати. Используется когерентный фемтосекундный титан-сапфировый лазер с частотой импульсов 80 МГц и длиной волны 780 нм [2]. Лазерный луч фокусируется в заданной точке в толще материала, в результате чего поглощаются два фотона [3]. Этот процесс запускает полимеризацию, и в фокальном объёме вокруг заданной точки внутри жидкого полимера образуется твёрдый участок, именуемый вокселем (размером 100 × 400 нм [2]). Траекторию движения лазерного луча задаёт модель рентгеновской линзы с параболическим профилем, представленная на рис. 2.

В ходе работы были получены серии рентгеновских линз из нескольких материалов на основе мономера PETA [4], которые отличаются между собой красителями. Также для этих материалов была определена оптимальная мощность лазерного излучения, при которой параболический профиль не деформируется. Определены радиусы кривизны полученных линз, которые отличаются от радиуса кривизны моделей на 20 %, что является следствием усадки материала после полимеризации. При этом пропорции при печати не изменились, что даёт основания использовать упомянутые полимеры для изготовления других структур.

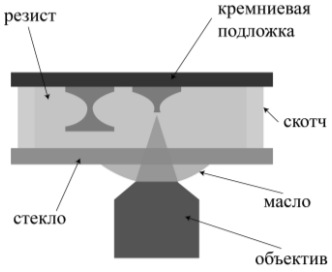


Рис. 1. Схема процесса печати на основе ДЛЛ

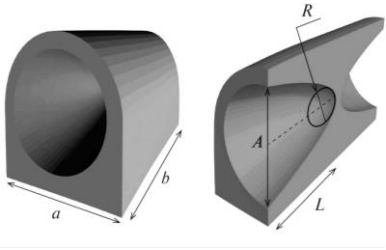


Рис. 2. Модель преломляющей рентгеновской микролинзы с параболическим профилем

Список литературы

1. Stöhr F. Microfabrication of hard x-ray lenses. 2015.

2. Nanoscribe: Photonic Professional (GT). User Manual. Nanoscribe GmbH, 2017.

3. Ovsianikov A., Mironov V., et al. // Expert review of medical devices. 2012. V. 9. No. 6. P. 613-633.

4. Stein O, Liu Y., et al. // Proceeding of SPIE. 2017. V. 10354. P. 103540L.

УДК 535(06)+004(06)

К.А. МАМЯН, А.Ю. ФРОЛОВ, В.В. ПОПОВ, А.А. ФЕДЯНИН
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

УСИЛЕНИЕ ЭКВАТОРИАЛЬНОГО МАГНИТООПТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА КЕРРА В ГИБРИДНЫХ НАНОРЕШЁТКАХ

Экспериментально и численно продемонстрировано усиление экваториального магнитооптического эффекта Керра в кремний-никелевых нанорешётках, обладающих резонансами Ми. Полученные значения эффекта превышают 4 %, что на порядок больше характерных значений для никелевой плёнки. Усиление вызвано возбуждением резонансов Ми в кремниевых нанонитях.

K.A. MAMIAN, A.Yu. FROLOV, V.V. POPOV, A.A. FEDYANIN
Lomonosov Moscow State University

TRANSVERSE MAGNETO-OPTICAL KERR EFFECT ENHANCEMENT IN HYBRID NANOGRATINGS

We experimentally and numerically demonstrate transverse magneto-optical Kerr effect enhancement in Si-Ni nanogratings which support Mie resonances. The obtained values of the effect exceed 4 % which is an order of magnitude larger than the ones in Ni film. The enhancement is caused by the excitation of Mie resonances in Si nanowires.

Резонансы Ми в диэлектрических наноструктурах, обладающих малыми оптическими потерями в видимом и ближнем ИК-диапазонах, представляют большой интерес в нанофотонике [1]. С их помощью можно локализовать электромагнитное поле в субволновых пространственных объёмах. Такую локализацию поля можно применять, в частности, для усиления экваториального магнитооптического эффекта Керра (ЭМОЭК). Последний представляет собой явление изменения интенсивности и фазы света при приложении внешнего магнитного поля к веществу. В наиболее распространённых магнитооптическиактивных металлах ЭМОЭК оказывается слишком малым по величине для практических целей. Поэтому усиление данного эффекта является актуальной задачей интегральной магнитооптики [2].

В данной работе изучается нанорешётка, представляющая собой массив периодически расположенных кремниевых нанонитей на никелевой подложке. Каждая отдельная нанонить обладает резонансами Ми. Образец изготовлен методами взрывной и электронно-лучевой

литографии. Период расположения, высота и ширина нитей составляют 720, 180 и 215 нм соответственно. Экспериментальные и полученные методом конечных разностей во временной области численные спектры отражения и ЭМОЭК при угле падения 50 ° представлены на рис. 1. Максимумам модуля ЭМОЭК соответствуют минимумы в спектрах отражения (рис. 1А и 1Б), для выяснения природы которых были построены расчётные ближнепольные распределения магнитного поля (рис. 1В и 1Г). Установлено, что усиление эффекта вызвано возбуждением магнитодипольной моды на длине волны 840 нм и электрической дипольной моды на длине волны 725 нм.

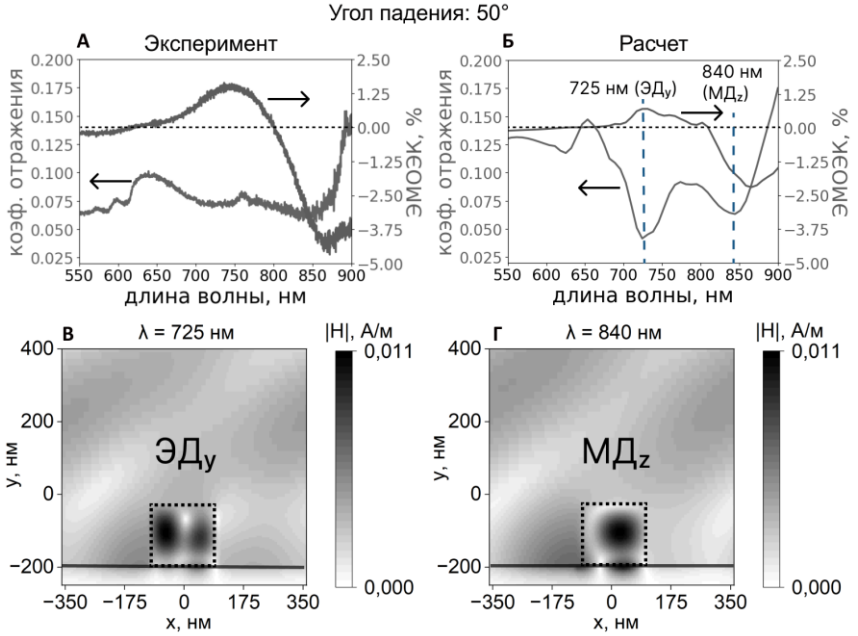


Рис. 1. Экспериментальные (А) и расчётные (Б) спектры отражения (левая шкала) и ЭМОЭК (правая шкала)., расчётные ближнепольные распределения магнитного поля в сечении образца на длинах волн 725 (В) и 840 нм (Г)

Список литературы

1. Kuznetsov A.I., et al. // Science. 2016. V. 354. P. 2472.
2. Barsukova M.G., Shorokhov A.S, et al. // ACS Photonics. 2017. V. 4. P. 2390-2395.

УДК 535(06)+004(06)

С.Е. МИНАЕВ[1,2], Д.И. АШИХМИН[1,2], Ю.К. СЕДОВА[1],
Н.В. МИНАЕВ[1], В.И. ЮСУПОВ[1]
[1]Институт фотонных технологий ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Троицк
[2]Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ЛАЗЕРНЫЙ БИОПРИНТИНГ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Приведены результаты экспериментов по лазерно-индуцированному переносу микрокапель гидрогеля с помощью одиночных фемтосекундных импульсов без поглощающего покрытия на донорной подложке. Определены оптимальные параметры, обеспечившие стабильный процесс переноса. Подтверждена возможность создания биопринтера с фемтосекундным лазером, в котором происходит перенос микрокапель за счёт поглощения импульсов в слое геля.

S.E. MINAEV[1,2], D.I. ASHIKHMIN[1,2], Yu.K. SEDOVA[1],
N.V. MINAEV[1], V.I. YUSUPOV[1]
[1]Institute of Photonic Technologies FSRC «Crystallography and Photonics» of the RAS, Troitsk
[2]National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

LASER BIOPRINTING USING FEMTOSECOND LASER PULSES

The results of experiments on laser-induced transfer of hydrogel microdroplets using single femtosecond pulses without an absorbing coating on a donor substrate are presented. The optimal parameters for ensure a stable transfer process were determined.

Технология лазерной биопечати широко используется в медицине для создания биоматериалов. Её модификация – лазерная инженерия микробных систем (ЛИМС) – успешно применяется для выделения трудно культивируемых микроорганизмов [1, 2], что важно для синтеза новых антибиотиков и биологически активных веществ. В этих технологиях обычно используются наносекундные импульсы и донорные подложки с поглощающим металлическим покрытием. При воздействии лазерных импульсов это покрытие частично разрушается, а образующиеся наночастицы оказывают негативное влияние на живые системы [3]. Обойти эту проблему позволяет использование фемтосекундных лазерных импульсов, для поглощения которых не требуется наличие

металлического покрытия. Целью данной работы является обоснование возможности создания технологии лазерного биопринтинга с использованием фемтосекундных импульсов.

На рис. 1. представлена фотография экспериментальной установки. В работе использован фс лазер ($E_{им}$ = 10 - 1000 мкДж, 1030 нм, 200 фс) и фокусирующий объектив L Plan с NA = 0.4 (f = 10,4 мм). Воздействие сфокусированным импульсом проводилось в слой геля толщиной 200 мкм, нанесённый на стеклянную подложку. Подложка располагалась в специальной кювете, изготовленной на 3D-принтере, внутри которой поддерживалась необходимая влажность. Динамика микроструй геля изучалась с помощью скоростной съёмки со скоростью 30 кк/с (рис. 2).

Определены оптимальные режимы лазерного воздействия для стабильного переноса микрокапель: 1) $E_{им}$ = 500 мкДж, 2) перетяжка смещена на 55 мкм в гель от его верхней границы. Установлено, что процесс переноса происходит лишь при скорости струи ≥ 60 м/с.

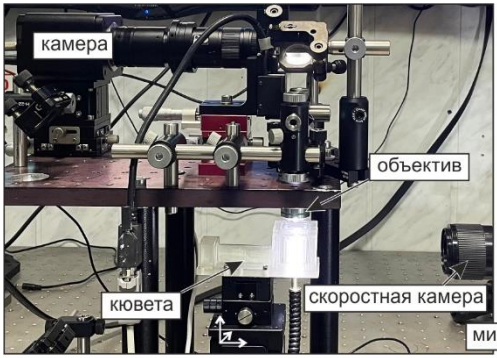


Рис. 1. Экспериментальная установка

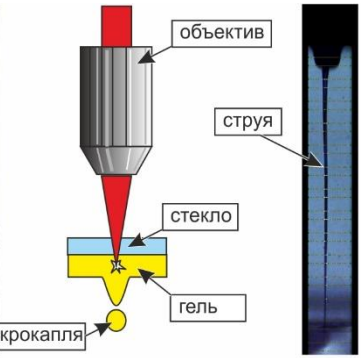


Рис. 2. Схема воздействия и кадр скоростной съёмки со струей геля

Работы поддержаны грантом РНФ № 20-14-00286.

Список литературы

1. Yusupov V.I., Gorlenko M.V., et al. // Laser Physics Letters. 2018. V. 15. No. 6. P. 462.
2. Gorlenko M.V., Chutko E.A., et al. // J. Biol. Eng. 2018. V. 12. P. 27
3. Cheptsov V.S., Churbanova E.S., et al. // Let. Appl. Microbiol. 2018. No. 67. P. 544-549.
4. Grosfeld E.V., Zhigarkov V.S., et al. // Int. J. Mol. Sci. 2022. V. 23. P. 9823

УДК 535(06)+004(06)

М.В. ЛЕВУСЬ[1,2], Г.Э. РИЗАЕВ[2], Д.В. ПУШКАРЕВ[2],
Л.В. СЕЛЕЗНЕВ[2]
[1]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
[2]Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

СПЕКТР ПЛАЗМЕННОГО КАНАЛА, ФОРМИРУЮЩЕГОСЯ ПРИ ОДНОЦВЕТНОЙ ФИЛАМЕНТАЦИИ УЛЬТРАКОРОТКИХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ, В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ

Произведена оценка спектра терагерцового излучения, генерируемого в процессе одноцветной филаментации при разных числовых апертурах лазерного пучка. Результаты получены с использованием новой методики, основанной на двумерных угловых распределений на различных частотах.

M.V. LEVUS[1,2], G.E. RIZAEV[2], D.V. PUSHKAREV[2],
L.V. SELEZNEV[2]
[1]Lomonosov Moscow State University
[2]Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

THE SPECTRUM IN THE TERAHERTZ RANGE OF THE PLASMA CHANNEL DURING SINGLE-COLOR FILAMENTATION OF ULTRASHORT LASER PULSES

The spectrum of terahertz radiation generated during the process of single-color filamentation at different numerical apertures of the laser beam has been estimated. The results were obtained using a new technique based on two-dimensional angular distributions at various frequencies.

Плазменные каналы, образующиеся при филаментации ультракоротких лазерных импульсов, являются одним из источников терагерцового (ТГц) излучения. Спектральные характеристики такого источника неоднородны в пространстве и зависят от угла между оптической осью, вдоль которой распространяется лазерный импульс, и прямой, направленной на детектор. Согласно ранее опубликованным работам [1], с уменьшением частоты угол распространения максимума интенсивности терагерцового излучения увеличивается. Кроме того такие частотно-угловые распределения могут быть неосесимметричными [2]. Целью настоящей работы является экспериментальное исследование спектральных характеристик

плазменного канала в терагерцовом диапазоне частот при различных числовых апертурах пучка.

В эксперименте использовались лазерные импульсы длительностью 90 фс, с центральной длиной волны 740 нм и энергией 3 мДж. Для изменения числовой апертурой пучка (NA) применялись сферические зеркала с различными фокусными расстояниями. В эксперименте регистрация ТГц-излучения осуществлялась с использованием болометра, а для наблюдения определённых частот использовался набор узкополосных фильтров. Методика исследования спектра основана на получении двумерной диаграммы направленности для каждой фиксированной частоты, пример распределения показан на рис. 1. Такая схема эксперимента позволяла учесть всевозможные направления распространения ТГц-излучения. Спектральная интенсивность рассчитывалась суммированием сигналов по элементарным площадкам диаграммы направленности.

На рис. 2 представлена зависимость спектральной интенсивности при различных числовых апертурах в терагерцовом диапазоне. Максимум интенсивности находится в интервале низких частот. При увеличении жесткости фокусировки лазерного импульса, интенсивность терагерцового излучения возрастает во всём диапазоне частот, причём значительный рост преобладает в области высоких частот.

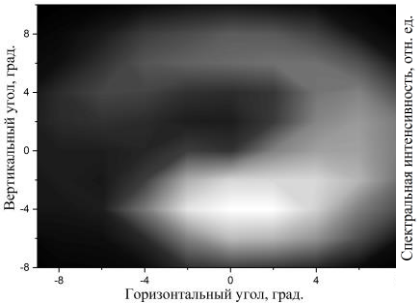


Рис. 1. Диаграмма направленности при частоте υ = 0.3 ТГц и числовой апертуре NA = 0.002

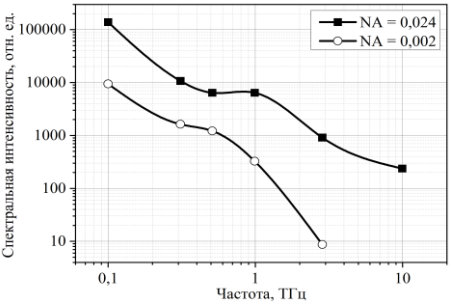


Рис. 2. Спектр плазменного канала в терагерцовом диапазоне при различных числовых апертурах

Список литературы

1. Rizaev G.E., et al. // Optics Letters. 2022. V. 47. P. 5917-5920.
2. Rizaev G.E., et al. // JETP Letters. 2022. V. 115. P. 657-659.

УДК 535(06)+004(06)

Т.С. МОЛЬКОВ, С.В. ФАДЕЕВ, И.Л. МАРТЫНОВ,
А.А. ПЛЕХАНОВ, А.А. ЧИСТЯКОВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ ПОЛОСОВЫХ ФИЛЬТРОВ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

В настоящей работе методом FDTD в программе MEEP проведено моделирование спектров пропускания метаповерхности на основе медной фольги, на поверхности которой присутствует рисунок в виде периодически повторяющихся крестов с характерным масштабом 100 мкм. Показано, что структура обладает полосой резонансного пропускания. На основе проведённых расчётов и данных литературы методом лазерной абляции изготовлены образцы полосовых фильтров для работы в диапазоне от 0,4 до 1,2 ТГц. Проведено исследование их спектральных свойств. Показано, что основные параметры изготовленных образцов соответствуют расчётным значениям. Исследовано влияние точности изготовления и числа периодов в структуре на величину коэффициента пропускания и спектральную ширину изготовленных полосовых фильтров.

T.S. MOLKOV, S.V. FADEEV, I.L. MARTYNOV A.A. PLEKHANOV,
A.A. CHISTYAKOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

MODELING AND FABRICATION OF TERAHERTZ BANDPASS FILTERS BY LASER ABLATION

In this work, the FDTD method is used to simulate the transmission spectra of a metasurface based on a copper foil. The MEEP software was used for the simulation. The metasurface was a periodic pattern of crosses with a characteristic scale of one hundred micrometers. It is shown that the structure has a resonant transmission band. Based on the simulation results and literature data, samples of bandpass filters for operation in the range from 0.4 to 1.2 THz were made by laser ablation. A study of their spectral properties has been carried out. It is shown that the main parameters of the fabricated samples correspond to the calculated values. The influence of the fabrication accuracy and the number of periods in the structure on the transmission coefficient and spectrum width of the bandpass filters is investigated.

Терагерцовое (ТГц) излучение в настоящее время находит своё применение в различных прикладных задачах. Отдельно можно выделить

направления связанные с терагерцовой спектроскопией [1, 2]. Во всех подобных приложениях необходимы элементы для управления спектром ТГц-излучения. В видимой области спектра подобные элементы традиционно создаются с помощью многослойных диэлектрических покрытий. Подобный подход применим и в ТГц-диапазоне, однако ограничен в силу большей длины волны и громоздкости получающихся структур. Гораздо перспективней выглядит использование метаповерхностей на основе проводящих сред [3].

В настоящей работе методом FDTD проведён расчёт спектров пропускания метаповерхности в виде периодической стеки на медной фольге, каждый элемент которой представляет собой крест с характерными размерами порядка ста микрометров. Установлены геометрические размеры элементов рисунка, позволяющие получить резонансное пропускание в области 0,4 - 1,2 ТГц, которые совпали с литературными данными [4]. На основе полученных результатов методом лазерной абляции медной фольги толщиной 100 мкм была изготовлена серия образцов полосовых фильтров. Для абляции использовалось излучение второй гармоники YAG:Nd-лазера с длительностью импульса 300 пс, энергией в импульсе 50 мкДж. Для фокусировки применялся объектив Nikon Plan Fluor 10 x 0.3. Исследованы спектры пропускания изготовленных образцов. Изучено влияние точности изготовления отдельного элемента метаповерхности на параметры спектров пропускания. Установлено, что типичный образец обладает уединённой полосой пропускания в области 0,4 - 1,2 ТГц шириной 100 - 150 ГГц и пропусканием до 65 %. Используемый подход к изготовлению демонстрирует хорошую воспроизводимость параметров спектров пропускания в серии однотипных образцов и позволяет изготавливать образцы разного масштаба.

Таким образом, продемонстрировано, что лазерная абляция с использованием второй гармоники YAG:Nd, работающего в режиме модуляции добротности с субнаносекундной длительностью импульса может быть использована для изготовления метаповерхностей из медной фольги для работы в ТГц-диапазоне.

Список литературы

1. Liu X., et al. // Journal of Physics and Chemistry of Solids. 2011. V. 72. P. 1245-1250.
2. Xie J.. et al. // Optical Materials Express 2018. V. 8. No. 1. P. 128-135.
3. Tian H.W., et al.// Frontiers in Physics. 2020. V. 8. P. 584077.
4. Demirhan Y., et al.// Optical and Quantum Electronics 2016. V. 48. P. 1-11.

Р.Г. БИКБАЕВ[1,2], ЧЭНЬ Г.-П.[3], И.В. ТИМОФЕЕВ[1,2]
[1]Институт физики им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск
[2]Сибирский федеральный университет, Красноярск
[3]Национальный университет Цинхуа, Тайнань, Тайвань

ДИНАМИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ СВЕТОВЫМ ПУЧКОМ В ДВУХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ С ПОМОЩЬЮ ТАММОВСКОГО ПЛАЗМОН-ПОЛЯРИТОНА

Продемонстрирована возможность динамического управления фазой и амплитудой отражённых волн с помощью таммовского плазмон-поляритона, локализованного на границе метаповерхность – фотонный кристалл.

R.G. BIKBAEV[1,2], K.-P. CHEN[3], I.V. TIMOFEEV[1,2]
[1]Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC SB RAS, Krasnoyarsk
[2]Siberian Federal University, Krasnoyarsk
[3]National Tsing Hua University, Tainan, Taiwan

TWO-DIMENSIONAL DYNAMIC BEAM STEERING BY TAMM PLASMON POLARITON

The possibility of dynamic beam steering by a Tamm plasmon polariton localized at the metasurface-photonic crystal boundary is demonstrated.

Метаповерхность представляет собой специальным образом структурированные субволновые элементы, предназначенные для эффективного управления фазой и амплитудой отражённого света [1]. При этом актуальной является задача создания настраиваемой метаповерхности, обеспечивающей формирование сколь угодно сложного волнового фронта [2].

В данной работе нами продемонстрирована возможность эффективной перестройки волнового фронта в телекоммуникационной области спектра посредством внедрения плёнки прозрачного проводящего оксида в структуру, поддерживающую возбуждение таммовского плазмон-поляритона (ТПП) [3]. Схематическое изображение исследуемой структуры представлено на рис. 1. Двумерная решётка из золотых нанокирпичей расположена на тонком слое сапфира, нанесённого на слой оксида индия, допированного оловом (ITO). Вся структура помещена на поверхность многослойного зеркала. Установлено, что на длине волны 1550 нм проявляется узкий резонанс, соответствующий ТПП.

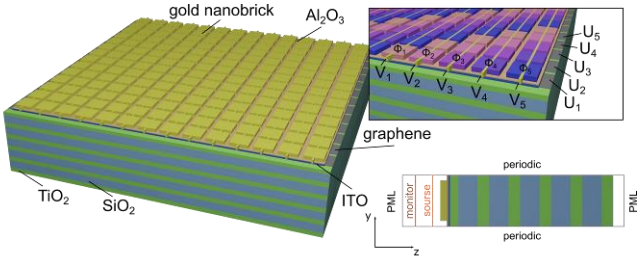


Рис. 1. Схематическое изображение исследуемой структуры

Увеличение приложенного к ITO-слою напряжения приводит к смещению резонансной длины волны в коротковолновую область спектра и значительному изменению фазы отражённой волны. Этот эффект может быть использован для управления лучом в двух пространственных направлениях, поскольку предложенная схема позволяет управлять фазой отражения от каждого нанокирпича.

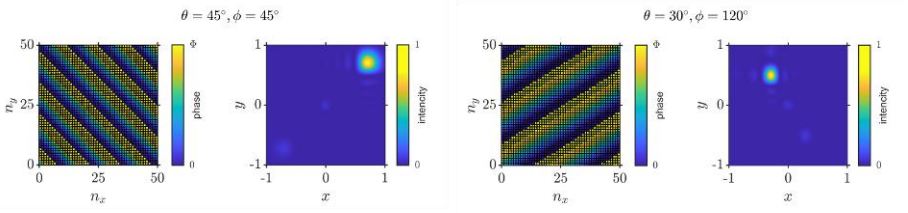


Рис. 2. Распределение фазы вдоль метаповерхности и распределение интенсивности в дальнем поле при различных значениях углов θ и φ

В отличие от ранее предложенной структуры на основе нанополос [4], которая позволяет изменять только угол θ, метаповерхность позволяет сформировать дифракционную решётку требуемого периода в двух пространственных направлениях и реализовать управление интенсивностью дифракционных порядков как по углу θ, так и по углу φ (рис. 2).

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 22-42-08003.

Список литературы

1. Chen W. T., et al. // Nat. Rev. Mat. 2020. V. 5. P. 604.
2. Huang Y.-W., et al. // Nano Lett. 2016. V. 16. P. 5319.
3. Kaliteevski M., et al. // Phys. Rev. B. 2007. V. 76. P. 165415.
4. Bikbaev R.G., et al. // Materials. 2022. V. 15, P. 6014.

УДК 535(06)+004(06)

Д.В. ПРОКОПОВА, Е.Г. АБРАМОЧКИН
Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

МЕСТОПОЛОЖЕНИЕ ПЛОСКОСТИ АВТОФОКУСИРОВКИ ТРИ-ЭЙРИ ПУЧКОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПАРАМЕТРА СМЕЩЕНИЯ

Представлены результаты аналитического и экспериментального исследования местоположения плоскости автофокусировки три-Эйри пучков. Показано, что эта плоскость монотонно удаляется от исходной плоскости с ростом параметра смещения. Вычисление точного местоположения плоскости автофокусировки связано с решением уравнения, содержащего несобственные двойные интегралы. Предложен способ существенного упрощения поиска решения этого уравнения переходом к фурье-образу три-Эйри пучка.

D.V. PROKOPOVA, E.G. ABRAMOCHKIN
[2]Samara Branch of Lebedev Physical Institute of the RAS

LOCATION OF THE AUTOFOCUSING PLANE OF THREE AIRY BEAMS DEPENDING ON THE SHIFT PARAMETER

The results of an analytical and experimental investigation of the autofocusing plane location three-Airy beams are presented. It is shown that this plane moves monotonically away from the initial plane when the shift parameter grows. Calculating the exact location of the autofocusing plane involves solving an equation containing 2D integrals. Based on the Fourier transform of three-Airy beams, a method is proposed which reduces 2D integrals to 1D ones and significantly simplifies the search for a solution.

С начала 2000-х годов световые поля, построенные на основе интегралов дифракционных катастроф [1], вызывают всё больший интерес у исследователей в области оптики и фотоники, благодаря свойствам, которые сильно отличают их от обычных Гауссовых пучков. Одним из таких свойств является автофокусировка световых полей, связанных с интегралами дифракционных катастроф. Проявляется данное свойство в виде возникновения области с сильной локализацией поля при распространении светового поля [2, 3]. Для три-Эйри пучков, описанных в [4], наблюдается свойство автофокусировки. Мы связываем его появление с изменением порядка роста функции, описывающей структуру поля при

распространении (в исходной плоскости порядок роста равен 3/2, в фурье-плоскости равен 3). Плоскость автофокусировки разделяет пространство на две большие области с разным типом структуры распределения интенсивности поля. Между исходной плоскостью и плоскостью автофокусировки интенсивность имеет вид набора пятен, локализованных в области треугольного вида. Между плоскостями автофокусировки и Фурье распределение интенсивности имеет вид концентрических треугольных контуров, трансформирующихся при распространении пучка в набор колец, очень похожий на моду Лагерра–Гаусса, но с супергауссовым убыванием по интенсивности. К настоящему времени нет строгого описания явления автофокусировки для параксиальных световых полей и не установлена связь местоположения плоскости автофокусировки с параметрами световых полей негауссова вида.

Целью работы является определение положения плоскости автофокусировки три-Эйри пучка при различных значениях параметра смещения. Результаты аналитического исследования сравниваются с результатами, полученными в эксперименте. Показано, что имеет место тенденция к смещению плоскости автофокусировки в сторону фурье-плоскости, когда параметр смещения пучка увеличивается (рис. 1).

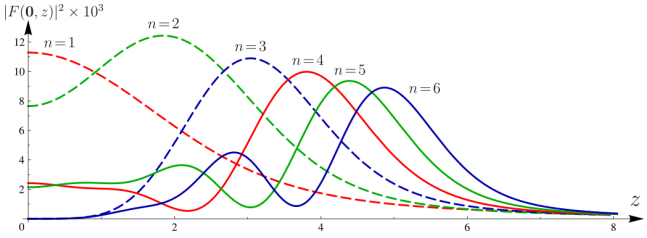


Рис. 1. Графики зависимости интенсивности $|F(\mathbf{0},z)|^2$ от z при выборе параметра смещения $3^{2/3}a = a'_n$ и $1 \le n \le 6$, точка глобального максимума характеризует местоположение плоскости автофокусировки z_s, при $n = 1$ такой плоскости нет, для остальных n плоскость существует и величина z_s с ростом n монотонно растёт

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ № 23-22-00314 «Интегралы дифракционных катастроф для задач современной фотоники» (https://rscf.ru/project/23-22-00314/).

Список литературы

1. Гилмор Р. Прикладная теория катастроф. В 2-х книгах. М. : Мир, 1984.
2. Efremidis N.K., Christodoulides D.N. // Opt. Lett. 2010. V. 35. No. 23, P. 4045.
3. Mansour D., Christodoulides D.N. // OSA Continuum. 2018. V. 1. No. 1. P. 104.
4/ Abramochkin E., Razueva E. // Opt. Lett. 2011. V. 36, P. 3732.

УДК 535(06)+004(06)

Е.Г. ЦИПЛАКОВА[1], Я.В. ГРАЧЕВ[1], Н.В. ПЕТРОВ[1,2]
[1]Университет ИТМО, Санкт-Петербург
[2]Харбинский инженерный университет, Циндао, Китай

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСТРОВОГО СКАНИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ «ДИАФРАГМА-ЛИНЗА» В ЗАДАЧЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ПОЛЕЙ БЕССЕЛЯ–ГАУССА

Рассмотрены этапы и особенности численного моделирования процесса растрового сканирования с помощью системы «диафрагма-линза» в методе импульсной терагерцовой голографии при исследовании широкополосных полей Бесселя–Гаусса. Преимуществом системы сканирования «диафрагма-линза» по сравнению с использованием только диафрагмы или матричного детектора является повышение надежности метода терагерцовой импульсной голографии при регистрации слабоинтенсивных полей. Проведено количественное сравнение энергетических характеристик, обеспечиваемых этими схемами сканирования.

E.G. TSIPLAKOVA[1], Ya.V. GRACHEV[1], N.V. PETROV[1,2]
[1]ITMO University, Saint-Petersburg
[2]Harbin Engineering University, Qingdao, China

NUMERICAL MODELLING OF RASTER SCANNING WITH "DIAPHRAGM-LENS" SYSTEM APPLIED FOR DETECTION OF BROADBAND TERAHERTZ BESSEL–GAUSSIAN BEAMS

The stages and features of numerical simulation of the raster scanning using the “diaphragm-lens” system in the method of terahertz pulsed time-domain holography (THz PTDH) are considered in the application to the study of broadband Bessel–Gaussian fields. The advantage of this scanning scheme compared to using the only diaphragm or a matrix detector is the increased reliability of the THz PTDH in registering weakly intense fields. A numerical comparison of the energy characteristics provided by these two scanning schemes is carried out.

Импульсные техники, основанные на регистрации временной зависимости широкополосного терагерцового (ТГц) поля, представляют собой перспективный подход для формирования ТГц фазовых изображений. Среди них импульсная ТГц-голография (THz PTDH) [1] выделяется возможностью достижения более высокого пространственного разрешения по сравнению с методом ТГц-спектроскопии (THz TDS) [2].

THz PTDH позволяет проводить измерения с высокой скоростью сканирования, что делает этот метод подходящим для времязависимых приложений. Кроме того, THz PTDH реализуется практически без использования оптических элементов, и детектируемое за объектом поле мало подвергается их влиянию. Однако, недостатком THz PTDH является размещение объекта внутри расширенного коллимированного ТГц-пучка, что в сравнении с THz TDS обеспечивает более слабый уровень сигнала при аналогичном уровне шума. Вместе с этим источники импульсного ТГц-излучения, как правило, обладают малой мощностью. Чтобы повысить эффективность детектирования, предложено введение в схему сканирования собирающей линзы, сопряжённой с диафрагмой. Целью работы является численное исследование данного технического решения.

Представлены результаты численного моделирования двух схем детектирования пространственно-временного распределения ТГц-поля: 1) с использованием сканирующей диафрагмы и 2) диафрагмы, сопряжённой с линзой. Исследование выполнено на примере импульсных ТГц-полей Бесселя–Гаусса (рис. 1), сформированных при прохождении коллимированного ТГц-поля через аксикон ($\alpha = 20$ °, $n = 1.46$ (0,1 - 1,5 ТГц)). Для второго случая при моделировании процесса сканирования поля реализовано синхронное перемещение диафрагмы и стоящей за ней линзы. Проанализированы особенности моделирования, связанные с учётом требования на разрешимость фазового распределения за апертурной маской в зависимости от параметров дискретизации модели. Количественно оценен прирост энергии в зоне детектирования, обеспечиваемый использованием системы «диафрагма-линза» по отношению к случаю сканирования диафрагмой.

Начальная стадия работы была выполнена при поддержке гранта РНФ (№ 19-72-10147).

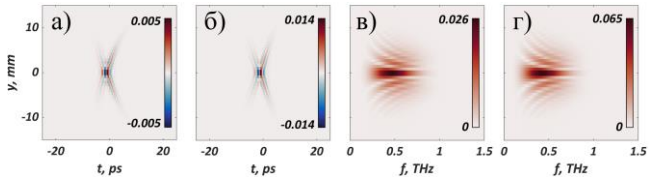


Рис. 1. Пример пространственно-временных (а, б) и пространственно-спектральных сечений поля (в-г), полученных в моделировании при сканировании поля диафрагмой (а, в) и системой «диафрагма-линза» (б, г)

Список литературы

1. Petrov N.V., et al. // IEEE Trans Terahertz Sci Technol. 2016. V. 6 (3). P. 464-472.
2. Neu J., et al. // Journal of Applied Physics. 2018. V. 124 (23).

УДК 535(06)+004(06)

М.Н. СИДОРОВА, И.С. ВЫСЛАНКО, Г.А. ЕРМОЛАЕВ
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный

ЭВОЛЮЦИЯ ТОЧЕК С ФАЗОВЫМИ ОСОБЕННОСТЯМИ В ДИХАЛЬКОГЕНИДАХ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

Теоретически обнаружили положения точек нулевого отражения в структуре 2DM/SiO_2/Si (2DM – двумерный материал). В пространстве параметров (длина волны падающего света, угол падения) проследили эволюцию точек фазовой сингулярности с увеличением толщины верхнего слоя дихалькогенидов переходных металлов.

M.N. SIDOROVA, I.S. VYSLANKO, G.A. ERMOLAEV
Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

EVOLUTION OF POINTS WITH A PHASE SINGULARITIES IN TRANSITION METAL DICHALCOGENIDES

Theoretically, the positions of zero reflection points in the 2DM/SiO_2/Si (2DM – two-dimensional material) structure were found. In the parameter space (wavelength, angle of incidence), the evolution of the phase singularity points was traced with an increase in the thickness of the upper layer of transition metal dichalcogenides.

Явления сингулярности фазы находит широкое применение в разных сферах науки и техники. Например, сингулярности фазы используются в методах цифровой голографии, поскольку позволяют путём сохранения и восстановления амплитуды и фазы воспроизводить полную информацию об исходном оптическом поле [1]. Также, сингулярности фазы приводят к сильному оптическому отклику в биосенсорных задачах. Использование эффекта фазовой сингулярности в безмаркерных биосенсорах позволяет улучшить их чувствительность [2], что открывает возможность для развития недорогих и сверхчувствительных приборов. Чувствительность таких сенсоров определяется углом пересечения дисперсионной кривой материала и поверхностью нулевого отражения, получающейся в результате приравнивания к нулю коэффициента отражения Френеля [3].

В данной работе была рассмотрена структура MoS_2/SiO_2(280 nm)/Si (рис. 1) при различных толщинах t слоя дисульфида молибдена (в диапазоне 100 - 1200 нм), было зафиксировано изменение положения топологических точек в пространстве параметров: угол падения, длина волны падающего света (рис. 2 - 4) [4].



Рис. 1. Исследуемая структура

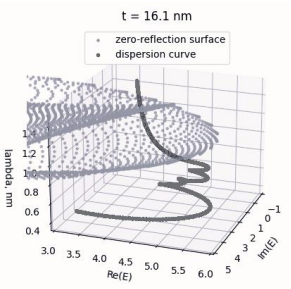


Рис. 2. Пересечение поверхности нулевого отражения и дисперсионной кривой материала

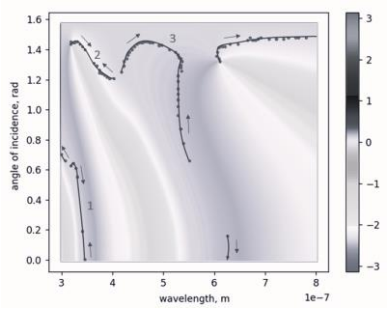


Рис. 3. Эволюция точек фазовой сингулярности для p-поляризации

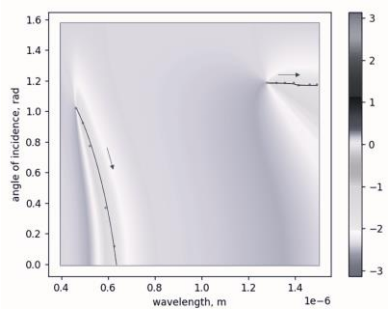


Рис. 4. Эволюция точек фазовой сингулярности для s-поляризации

Список литературы

1. Balyiyskiy C., Gurov I. Restoration of information about an object in digital holography based on the transport equation.

2. Tselikov G., Danilov A., Shipunova V., Deyev S., Kabashin A., Grigorenko A. Topological darkness: how to design a metamaterial for optical biosensing with virtually unlimited sensitivity // ACS Nano. 2023.

3. Ermolaev G., Voronin K., Baranov G., Kravets V., Tselikov G., Stebunov Yu., Yakubovsky D., Novikov S., Vyshnevyy A., Mazitov A., Kruglov I., Zhukov S., Romanov R., Markeev A., Arsenin A., Novoselov K., Grigorenko A., Volkov V. Topological phase singularities in atomically thin high-refractive-index materials // Nature Communications. 2022.

4. Álvarez-Pérez G., Voronin K., Volkov V., Alonso-González P., Nikitin A. Analytical approximations for the dispersion of electromagnetic modes in slabs of biaxial crystals // Physical Review B. 2019. V. 100. P. 235408.

В.М. ЛЕВКОВСКАЯ[1], А.В. ХАРИТОНОВ[1], С.С. ХАРИНЦЕВ[1,2]
[1]Казанский (Приволжский) федеральный университет
[2]Институт прикладных исследований АН Республики Татарстан, Казань

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СРЕДЫ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ АНАЛОГОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Нестационарные среды представляют собой новый класс искусственных электромагнитных материалов с уникальными свойствами. В настоящей работе исследуется возможность использования данных материалов для создания аналоговых вычислительных устройств. Изучается процесс взаимодействия света со средой, испытывающей разовое переключение диэлектрической проницаемости. Показано, что длительность и глубина переключения определяют амплитуду и частоту отражённой/преломленной волны, соответственно. При наличии в среде частотной дисперсии в спектре возникает несколько дополнительных компонент. Полученные результаты могут лечь в основу создания аналоговых оптических компьютеров.

V.M. LEVKOVSKAYA[1], A.V. KHARITONOV[1], S.S. KHARINTSEV[1,2]
[1]Kazan (Volga Region) Federal University
[2]Intitute of Perspective Researches of Tatarstan Academy of Sciences, Kazan

TIME-VARYING MATERIALS FOR ANALOG OPTICAL COMPUTING

Time-varying media represent a new class of artificial electromagnetic materials with unique properties. The refractive index of these media undergoes abrupt changes on the scale of the period of the incident wave. In this work, we explore the possibility of using these materials for analog optical computing. We investigate the light interaction with a medium experiencing a step-like switching of the permittivity. It is shown that the duration and depth of switching governs the amplitudes and frequencies of the time reflected and refracted waves, respectively. The spectral dispersion of the permittivity gives rise to several additional frequency components. The obtained results can be used for the realization of analog optical computers.

С появлением искусственных материалов появились новые возможности в управлении светом. В оптических метаматериалах это достигается за счёт внедрения пространственных неоднородностей. В недавних работах [1] продемонстрирован альтернативный способ управления электромагнитными волнами, основанный на использовании нестационарных сред. Материал в этом случае является неоднородным не

в пространстве, а во времени. В настоящей работе исследуется возможность использования нестационарных сред для создания вычислительных метаматериалов [2]. Данные устройства позволяют модулировать падающий на них свет таким образом, что прошедший сигнал является результатом применения некой заданной математической операции над падающим.

Взаимодействие света с нестационарной средой приводит к возникновению волн, движущихся в противоположных направлениях и называемых прошедшей и отражённой. Амплитуды и частота этих волн оказываются отличной от падающей. Для описания эффектов в нестационарных средах зачастую используется простейшая модель мгновенного ступенчатого переключения и пренебрегается спектральной дисперсией. В настоящей работе исследуется оптический отклик нестационарной среды, обладающей дисперсией и конечной скоростью переключения. За основу была взята модель дисперсии Лоренца. Показано, что за счёт временной модуляции плазменной частоты, собственной частоты или коэффициента затухания, можно гибким образом управлять спектральными составом отражённой/преломленной волн (рис. 1). Скорость переключения определяет амплитуду образовавшихся волн. Нестационарные среды открывают уникальные возможности в управлении светом, что может быть использовано для создания новых устройств.

Работа выполнена за счёт средств Российского научного фонда (22-72-00091)

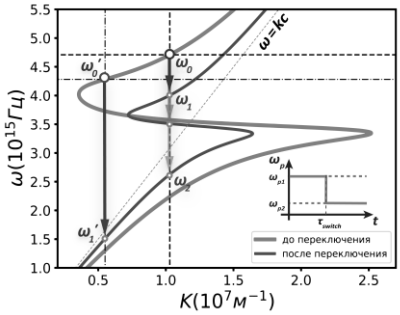


Рис. 1. Дисперсионные кривые при различных значениях плазменной частоты в модели Лоренца

Список литературы

1. Karimi M., et al. // Nanophotonics. 2023.V. 12. P. 1733-1740.
2. Silva A., et al. // Science. 2014. V. 343. P. 160-163.

УДК 535(06)+004(06)

Е.А. ВАШУКЕВИЧ, Т.Ю. ГОЛУБЕВА, Е.Н. БАШМАКОВА
Санкт-Петербургский государственный университет

ПЕРЕПУТЫВАЮЩИЕ И НЕЛОКАЛЬНЫЕ КВАНТОВЫЕ ОПЕРАЦИИ, ОСНОВАННЫЕ НА QND-ВЗАИМОДЕЙСТВИИ В СВЕТОАТОМНЫХ СИСТЕМАХ

Разработка протоколов и алгоритмов квантовых вычислений сегодня является непростой задачей для научного сообщества. В нашей работе мы предлагаем рассматривать квантовое неразрушающее (QND) взаимодействие между ансамблем холодных атомов и многомодовым светом с ОУМ как один из возможных способов реализации квантовых вентилей в дискретных переменных. Показано, что рассматриваемая система позволяет выполнять операции SWAP и √SWAP одновременно на нескольких двухкубитных системах.

E.A. VASHUKEVICH, T.Yu. GOLUBEVA, E.N. BASHMAKOVA
Saint-Petersburg State University

ENTANGLING AND NON-LOCAL QUANTUM OPERATIONS BASED ON QND INTERACTION IN LIGHT-ATOMIC SYSTEMS

The development of quantum computing protocols and algorithms is a challenging task for the scientific community today. In our work, we propose to consider quantum non-demolition (QND) interaction between an ensemble of cold atoms and multimode OAM light as one of the possible ways to implement quantum gates in discrete variables. It is shown that the system under consideration allows performing SWAP and √SWAP operations simultaneously on several two-qubit systems.

В квантовых вычислениях в дискретных переменных в качестве ресурса используются дискретные степени свободы фотона, например, поляризация (которая кодирует состояние бинарного логического объекта – кубита) [1] или орбитальный угловой момент света (ОУМ) (который кодирует многомерное логическое состояние – кудит) [2]. Для построения произвольной унитарной вычислительной операции в дискретных переменных необходимо уметь выполнять как минимум две однокубитные (однокудитные) операции и одну двухкубитную управляемую операцию [3]. Однако создание двухкубитного управляемого квантового вентиля является сложной задачей, поскольку фотоны не взаимодействуют напрямую.

В нашей работе [4, 5] мы предложили метод реализации квантовых однокубитных вентилей, а также обобщили кубитные протоколы к системам более высокой размерности – кудитам. Были предприняты успешные попытки построить однокудитные квантовые логические элементы на одиночных фотонах, обладающих ОУМ [6, 7]. В то же время построение двухкубитных вентилей над кубитами, кодируемыми через состояния оптических полей, является нетривиальной задачей из-за отсутствия прямого взаимодействия между световыми состояниями.

Мы рассматриваем квантовое неразрушающее (QND) взаимодействие между ансамблем холодных атомов и многомодовым светом с ОУМ как один из возможных способов реализации квантовых вентилей в дискретных переменных. Показано, что рассматриваемая система позволяет выполнять операции SWAP и √SWAP одновременно на нескольких двухкубитных системах [8], что, несомненно, является преимуществом при решении проблемы масштабируемости.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 24-22-00004), и Фонда развития теоретической физики и математики. «БАЗИС» (Грант 22-1-4-20-1).

Список литературы

1. Barrett S.D., Kok P. Efficient high-fidelity quantum computation using matter qubits and linear optics // Physical Review A. 2005. V. 71. No. 6. P.060310.

2. Gottesman D. Fault-tolerant quantum computation with higher-dimensional systems // NASA International Conference on Quantum Computing and Quantum Communications. Berlin, Heidelberg: Springer, 1998. P. 302-313.

3. Deutsch D.E., Barenco A., Ekert A. Universality in quantum computation // Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences. 1995. V. 449. No. 1937. P. 669-677.

4. Vashukevich E.A., Golubeva T.Yu., Golubev Yu. M. Conversion and storage of modes with orbital angular momentum in a quantum memory scheme // Physical Review A. 2020. V. 101. No. 3. P. 033830.

5. Vashukevich E.A., Bashmakova E.N., Golubeva T.Yu., Golubev Yu.M. High-fidelity quantum gates for OAM single qudits on quantum memory // Laser Physics Letters. 2022. V. 19. P. 025202/

6. Babazadeh A., Erhard M., Wang F., Malik M., Nouroozi R., Krenn M., Zeilinger A. Highdimensional single-photon quantum gates: concepts and experiments // Physical Review Letters. 2017. V. 119. P. 180510.

7. Gao X., Krenn M., Kysela J., Zeilinger A., Arbitrary d-dimensional Pauli X gates of a flying qudit // Physical Review A. 2019. V. 99. P. 023825.

8. Башмакова Е.Н., Вашукевич Е.А., Голубева Т.Ю. Параллельная многокубитная эволюция в протоколе квантового неразрушающего взаимодействия // Оптика и спектроскопия. 2023. Т. 131. № 7.

УДК 535(06)+004(06)

А.В. ЦУКАНОВ
Физико-технологический институт им. К.А. Валиева РАН, Москва

РЕЗОНАНСНОЕ КУЛОНОВСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭКСИТОННОГО И ЗАРЯДОВОГО КУБИТОВ

Рассматривается алгоритм запутывания состояний экситонного кубита на одиночной квантовой точке и зарядового кубита на двойной квантовой точке. Анализируется возможность выполнения условной двухкубитной операции CNOT с помощью лазерных переходов и эффекта Фёрстера. Приводятся оценки параметров системы, для которых данная операция реализуется с вероятностью, близкой к единице.

A.V. TSUKANOV
Valiev Institute of Physics and Technology of the RAS, Moscow

RESONANT COULOMB INTERACTION OF EXCITONIC AND CHARGE QUBITS

An algorithm for entangling the states of an exciton qubit on a single quantum dot and a charge qubit on a double quantum dot is considered. The possibility of performing a conditional two-qubit CNOT operation using laser transitions and the Förster effect is analyzed. Estimates of the system parameters are given for which this operation is implemented with a probability close to unity.

Полупроводниковые квантовые точки (КТ) рассматриваются многими исследователями в качестве функциональных элементов квантовых вычислительных устройств и нанофотонных сетей [1, 2]. Известны несколько способов представления кубита при помощи спиновых, электронных и экситонных состояний КТ. При этом возникает необходимость преобразования кубита одного типа в кубит другого типа в зависимости от конкретной задачи. Ранее была предложена схема частотной конверсии, позволяющая трансформировать фотонный кубит в экситонный, а экситонный – в зарядовый кубит благодаря воздействию комбинации полей лазера и микрорезонатора [3]. В данной работе анализируется алгоритм запутывания экситонного и зарядового кубитов без участия квантового фотонного поля резонатора. Их взаимодействие осуществляется с помощью эффекта Фёрстера, обеспечивающего прямой энергетический обмен между электронами двух КТ [4]. Экситонный кубит формируется на одиночной КТ. Его логические состояния – вакуумное и

экситонное состояния КТ. Зарядовый кубит представлен двойной КТ (далее – ДКТ), основные (логические) состояния которой локализованы в разных КТ [5]. Отметим, что частота перехода между вакуумным и экситонным состояниями КТ соответствует ширине запрещённой зоны (около 1 эВ), а частота перехода между основными и вспомогательными электронными состояниями ДКТ – разности их энергий (0.04 - 0.06 эВ). Для организации резонансного фёрстеровского обмена между КТ и ДКТ электрон, входящий в экситон, переводится лазерным импульсом из основного в возбуждённое состояние, причём частоты электронных переходов КТ и ДКТ выбираются достаточно близкими. Резонансное взаимодействие электронов инициирует сложную осцилляционную динамику, которая и приводит к запутыванию кубитов.

Как было установлено, существуют несколько режимов управления системой, позволяющих выполнить операцию «контролируемое-НЕ» (CNOT) с экситонной КТ в качестве контролирующего кубита. Наиболее подходящим для данной цели является резонансно-кулоновский режим, для которого характерно преобладание фёрстеровской динамики над туннельным переносом и некогерентными процессами. Большая величина энергии Фёрстера обеспечивает устойчивость к технологическим отклонениям и к диссипативным эффектам по сравнению с резонансно-туннельным режимом, позволяя добиться высокой точности воспроизведения (F = 0.98 - 0.99) для операции CNOT.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ФТИАН им. К.А. Валиева РАН Минобрнауки РФ по теме № FFNN-2022-0016 «Фундаментальные и прикладные исследования в области разработки методов высокоточного моделирования и контроля элементной базы квантовых компьютеров».

Список литературы

1. Kim J.-H., Aghaeimeibodi S., et al. // Optica. 2020. V. 7. P. 291.
2. Lodahl P., Mahmoodian S., Stobbe S. // Rev. Mod. Phys. 2015. V. 87. P. 347.
3. Цуканов А.В. // Оптика и спектроскопия. 2017. Т. 123. № 4. С. 591.
4. Головинский П.А. // ФТП. 2014. Т. 48. С. 781.
5. Цуканов А.В., Катеев И.Ю. // Микроэлектроника. 2013. Т. 42. С. 246.

УДК 535(06)+004(06)

Т.Р. ЮНУСОВ[1,2], Д.А. ЧЕРМОШЕНЦЕВ[1,2,3], А.В. МАСАЛОВ[1,4], И.А. БИЛЕНКО[1,5]

[1]Российский квантовый центр, Сколково
[2]Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный
[3]Сколковский институт науки и технологий
[4]Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва
[5]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ИНТЕГРАЛЬНОЙ КОГЕРЕНТНОЙ МАШИНЫ ИЗИНГА

Представлены результаты численного моделирования системы связанных оптических кубично-нелинейных кольцевых микрорезонаторов, возбуждаемых двухчастотной накачкой. Показывается, что такая система является перспективной платформой для решения задач бинарной комбинаторной оптимизации за счёт возникновения фазовой бистабильности в системе за счёт процесса вырожденного четырёхволнового смешения, протекающего в микрорезонаторах. Проводится анализ устойчивости системы к шумам различной природы.

T.R. YUNUSOV[1,2], D.A. CHERMOSHENTSEV[1,2,3], A.V. MASALOV[1,4], I.A. BILENKO[1,5]

[1]Russian Quantum Center, Skolkovo
[2]Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny
[3]Skolkovo Institute of Physics and Technology
[4]Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow
[5]Lomonosov Moscow State University

NUMERICAL STUDY OF THE EFFICIENCY OF THE INTEGRATED COHERENT ISING MACHINE

The results of numerical simulation of a system of coupled optical cubic-nonlinear ring microresonators excited by bicromatic pumping are presented. It is shown that such a system is a promising platform for solving binary combinatorial optimization problems due to the occurrence of phase bistability in the system due to the process of degenerate four-wave mixing occurring in microresonators. The stability of the system to noise of various nature is analyzed.

Оптические вычисления являются одним из перспективных направлений развития современной фотоники. Интегральная когерентная

машина Изинга (ИКМИ) – фотонное вычислительное устройство на чипе, которое состоит из нескольких кольцевых интегральных микрорезонаторов и системы оптической связи между ними [1]. В работе [2] была продемонстрирована возможность применения ИКМИ для решения задач бинарной комбинаторной оптимизации. В настоящей работе проводится численное моделирование системы из 20 микрорезонаторов, и исследуется вопрос об устойчивости работы ИКМИ по отношению к частотным шумам источников накачки, фазовым шумам сигнала накачки и фазовым шумам обратной связи. В качестве основного показателя, характеризующего устойчивость работы ИКМИ, принята вероятность достижения системой состояния с наименьшей энергией Изинга.

В рамках модели была исследована оптимизация плотных графов размерности 20 x 20. На рассматриваемой выборке средняя вероятность нахождения основного состояния системы была 98 % в отсутствии шумов. Было получено, что данная вероятность не деградирует при значении шумов ниже порогового, однако при значении шумов выше порогового вероятность достижения основного состояния резко падает. В частности, пороговое значение для частотного шума отстройки накачки равно 34 МГц (рис. 1), для фазового шума сигнала накачки равно 0.02 Рад, для фазового шума сигнала обратной связи равно 0.5 Рад. При совместном влиянии шумов различных типов, значения которых близки к пороговым, вероятность нахождения основного состояния превышает 95 % (рис. 2).

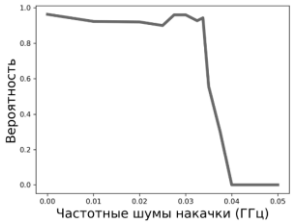


Рис. 1. Вероятности от частотных шумов

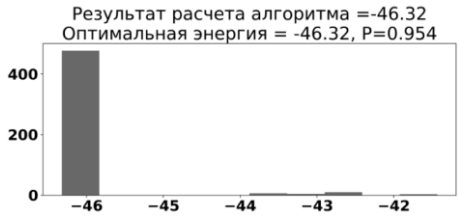


Рис. 2. Распределение запусков по энергии

Список литературы

1. Okawachi Y., Yu M., Jang J.K., et al. Demonstration of chip-based coupled degenerate optical parametric oscillators for realizing a nanophotonic spin-glass // Nat. Commun. 2020. V. 11. P. 4119.

2. Inagaki T., Inaba K., Hamerly R., et al. Large-scale Ising spin network based on degenerate optical parametric oscillators // Nat. Photon. 2016. V. 10. P. 415-419.

УДК 535(06)+004(06)

М.В. САВЕЛЬЕВ, К.Е. АЛЕФЕРКИНА
Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева

ВЛИЯНИЕ ПОВОРОТА СЛОЯ ПОЛИДИСПЕРСНОЙ СУСПЕНЗИИ НАНОЧАСТИЦ НА ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧЕТЫРЁХВОЛНОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ

Представлены результаты численного анализа пространственных характеристик четырёхволнового преобразователя излучения в зависимости от угла поворота плоского слоя водной суспензии с учётом дисперсности содержащихся в ней сферических частиц полистирола.

M.V. SAVELYEV, K.E. ALEFERKINA
Samara National Research University

INFLUENCE OF THE LAYER ROTATION OF THE POLYDISPERSE SUSPENSION OF NANOPARTICLES ON THE SPATIAL CHARACTERISTICS OF THE FOUR-WAVE RADIATION CONVERTER

We present the results of a numerical analysis of the spatial characteristics of the four-wave radiation converter depending on the rotation angle of the plane layer of an aqueous suspension taking into account the dispersity of the spherical polystyrene particles contained in it.

Решение задач микроскопии наночастиц, коллоидных квантовых точек и компонент живых клеток, использующих в качестве основного инструмента четырёхволновые преобразователи излучения (ЧПИ) [1 - 4], невозможно без определения точности преобразования такими устройствами пространственного распределения амплитуды сигнальной волны на входе в соответствующее распределение амплитуды объектной волны на выходе. Недавние исследования [5, 6] показали, что при ортогональности плоского слоя суспензии гравитационному полю вид модуля пространственного спектра объектной волны в результате электрострикции наночастиц и действия на них силы тяжести зависит от параметров распределения наночастиц по размерам (их среднего радиуса a_0 и среднеквадратичного отклонения σ).

Цель работы: анализ пространственных характеристик ЧПИ в зависимости от угла наклона слоя (θ) по отношению к гравитационному полю и среднеквадратичного отклонения в нормальном и логарифмически-нормальном распределениях наночастиц по размерам.

Численный анализ проведён для ЧПИ на длине волны 532 нм при комнатной температуре в водной суспензии толщиной 1 мм сферических наночастиц полистирола со средними радиусами $a_0 = 100$ и 150 нм в диапазоне σ/a_0 от 0 до 0.45. Установлено, что такие значения a_0 соответствуют введённым в [5] диапазонам малых и промежуточных эффективных масс наночастиц. В них пространственная селективность ЧПИ характеризуется полушириной провала в модуле пространственного спектра объектной волны ($\Delta\chi$) [5, 6] и шириной побочного минимума ($\Delta\chi_1$), который наблюдается при $\theta \leq 90$ °.

При $a_0 = 100$ нм и фиксированном угле θ (в диапазоне от 0 до 90 °) с ростом σ и при замене нормального распределения на логарифмически-нормальное полуширина $\Delta\chi$ увеличивается. В случае же фиксации σ в зависимости $\Delta\chi$ от θ существует минимальное значение, которое при некотором σ начинает смещаться в область меньших углов.

При $a_0 = 150$ нм и фиксированном угле θ (в диапазоне от 86 до 90 °) с ростом σ ширина побочного минимума $\Delta\chi_1$ уменьшается, как и при замене нормального распределения на логарифмически-нормальное. При фиксации σ в зависимости $\Delta\chi_1$ от θ также существует минимальное значение (но уже во всём диапазоне σ/a_0 от 0 до 0.45), которое с ростом σ смещает в область больших θ. Малость диапазона углов связана с определением $\Delta\chi_1$ аналогично ширине провала, введённой в работе [5], а именно при $\theta = 90°$.

Таким образом, можно сделать вывод, что для среднего радиуса a_0, лежащего как в диапазоне малых, так и в диапазоне промежуточных эффективных масс, возможно подобрать угол, при котором будут достигаться оптимальные пространственные характеристики ЧПИ на основе полидисперсных суспензий.

Список литературы

1. Kosionis S.G., Paspalakis E. // Physica E. 2022. V. 135. P. 114907.

2. Wigger D., Schall J., et al. // ACS Photonics. 2023. V. 10. P. 1504.

3. Pope I., Ferreira N.G.C., Kille P., Langbein W., Borri P. // Appl. Phys. Lett. 2023. V. 122. P. 153701.

4. Geng Y., Cong L., et al. // Laser Optoelectron. Prog. 2022. V. 59 (6). P. 0617024.

5. Savelyev M.V, Ivakhnik V.V. // Radiophys. Quantum Electron. 2021. V. 63 (8). P. 625.

6. Ивахник В.В., Савельев М.В. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2023. Т. 26. № 1. С. 9.

УДК 535(06)+004(06)

А.В. ЦУКАНОВ, И.Ю. КАТЕЕВ
Физико-технологический институт им. К.А. Валиева РАН, Москва

ГЕНЕРАЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-КОРРЕЛИРОВАННЫХ ФОТОННЫХ СОСТОЯНИЙ В ОПТИЧЕСКОЙ ПЛАНАРНОЙ СТРУКТУРЕ С КВАНТОВОЙ ТОЧКОЙ

Предложена модель узла квантовой сети на основе оптической планарной структуры с квантовой точкой, выполняющей роль источника и маршрутизатора одиночных фотонов и коррелированных фотонных пар. Изучены методы управления пространственно-запутанными состояниями узла с помощью локальной модификации его оптических свойств. Рассчитана точность воспроизведения этих состояний и время их генерации. Показана возможность температурной настройки оптического спектра треугольных и квадратных планарных структур, состоящих из четырёх GaAs-микродисков. Рассчитаны частоты собственных мод в зависимости от температуры и расстояния между микродисками.

A.V. TSUKANOV, I.Yu. KATEEV
Valiev Institute of Physics and Technology of the RAS, Moscow

GENERATION OF SPATIALLY CORRELATED PHOTON STATES IN AN OPTICAL PLANAR STRUCTURE WITH A QUANTUM DOT

A model of a quantum network node based on an optical planar structure with a quantum dot, which acts as a source and a router of single photons and correlated photon pairs, is proposed. Methods for coherent control of the spatially entangled states of a node with the help of local modification of its optical properties are studied. The fidelity and the time of their generation are calculated. The possibility of temperature tuning of the optical spectrum of triangular and square planar structures consisting of four GaAs microdisks is shown. The dependences of the wavelengths of eigenmodes on temperature and distance between the microdisks are calculated.

Развитие нанофотонных технологий стимулируется возрастающими потребностями в надежных и безопасных квантовых системах связи [1], в квантовых вычислениях [2], а также в высокочувствительных сенсорах нового поколения [3]. Необходимым ресурсом для функционирования этих устройств являются запутанные состояния фотонов, поддерживающие нелокальные корреляции между отдельными элементами устройства. Поэтому при проектировании квантовых

приборов, использующих в качестве носителей информации фотоны, большое внимание уделяется вопросам их генерации и транспортировке. Один из распространённых методов генерации основан на вынужденной эмиссии фотонов полупроводниковой квантовой точкой (КТ) [4].

В данной работе изучается вопрос о генерации и разделении фотонов внутри оптической планарной структуры из четырёх микрорезонаторов (МР), содержащей КТ, за счёт локального варьирования её параметров (рис. 1). Физическим механизмом, обеспечивающим настройку частот МР, является зависимость объёма и показателя преломления МР от температуры [5]. Исследованы спектральные свойства треугольной и квадратной планарных структур на основе четырёх микродисковых МР. Анализ пространственной структуры оптических мод позволил выявить те из них, которые пригодны для получения одно- и двухфотонных суперпозиций мод портовых МР. Описаны алгоритмы генерации запутанных фотонных состояний интересующего типа, в том числе и NOON-состояния, и определена их точность воспроизведения с учётом технологических отклонений. Исследована возможность температурной настройки оптического спектра за счёт нагрева одного из МР.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ФТИАН им. К.А. Валиева РАН Минобрнауки РФ по теме № FFNN-2022-0016 «Фундаментальные и прикладные исследования в области разработки методов высокоточного моделирования и контроля элементной базы квантовых компьютеров».

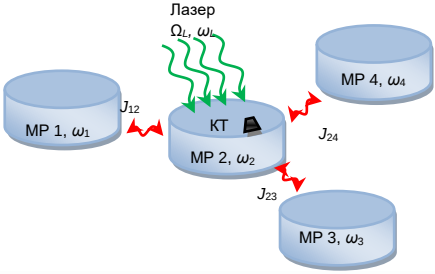


Рис. 1. Схема узла квантовой сети на основе треугольной оптической планарной структуры, образованной четырьмя МР и КТ

Список литературы

1. Schimpf C., Reindl M., et al. // Sci. Adv. 2021. V. 7. P. eabe8905.
2. Цуканов А.В., Катеев И.Ю. // Микроэлектроника. 2013. Т. 42. С. 246.
3. Shakoor A., Grant J., et al. // Sensors. 2019. V. 19. P. 1715.
4. Beveratos A., Abram I., et al. // Eur. Phys. J. D. 2014. V. 68. P. 377.
5. Lin H., Chen J.-H., et al. // Optics Express. 2010. V. 18. P. 23948.

УДК 535(06)+004(06)

А.В. ШИРОКОВА, А.В. МАСЛОВ, М.И. БАКУНОВ
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

МАТЕРИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛАЗМОНОВ НА НЕСТАЦИОНАРНОМ ГРАФЕНЕ

Обсуждаются материальные уравнения для описания электромагнитных процессов на поверхности графена, концентрация носителей в котором изменяется во времени. Показано, что случаям инжекции и удаления носителей соответствуют различные материальные уравнения. На основе сформулированных материальных уравнений исследована трансформация плазмона при периодической модуляции концентрации носителей во времени.

A.V. SHIROKOVA, A.V. MASLOV, M.I. BAKUNOV
Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

CONSTITUTIVE RELATIONS FOR SURFACE PLASMONS ON DYNAMIC GRAPHENE

Constitutive relations for electromagnetic fields on graphene with time-varying carrier density are discussed. It is shown that constitutive relations differ in the cases of increasing and decreasing carrier density. By using the obtained constitutive relations, a surface plasmon transformation on dynamic graphene with a periodic modulation of carrier density is studied.

Графен является перспективным материалом для активной плазмоники благодаря способности поддерживать слабо затухающие плазмоны, характеристиками которых можно эффективно управлять путём изменения концентрации носителей в графене. В недавних работах была предсказана возможность параметрического усиления плазмона на поверхности нестационарного графена при периодическом изменении во времени концентрации носителей [1, 2]. В этих работах, однако, не учитывается, что стадии увеличения и уменьшения концентрации носителей должны описываться разными материальными уравнениями.

Цель настоящей работы – получение материальных уравнений для электромагнитных полей на поверхности графена с периодически изменяющейся во времени концентрацией носителей, адекватных физическим механизмам нестационарности, а именно, инжекции и удалению носителей.

В работах [1, 2] для описания плотности тока носителей в графене $j(x, t)$ при периодическом изменении концентрации носителей было использовано уравнение

$$\frac{\partial j}{\partial t} = -\gamma j + W_D(t) E_x(x,t), \tag{1}$$

где γ – частота соударений, $W_D(t)$ – зависящий от концентрации носителей $N(t)$ вес Друде, $E_x(x, t)$ – продольная (по отношению к плоскости графена) компонента электрического поля. На самом деле, данное уравнение применимо только для описания инжекции носителей и не может быть использовано в случае удаления носителей, поскольку не учитывает исчезновения их тока. При удалении носителей уравнение (1) необходимо дополнить членом $-(\mu_r/2) j$, отвечающим за исчезновение тока:

$$\frac{\partial j}{\partial t} = -\gamma j + W_D(t) E_x(x,t) - \frac{\mu_r(t)}{2} j, \tag{2}$$

где μ_r – темп удаления носителей.

В случае быстрых изменений концентрации носителей удобно применять граничные условия. Путём интегрирования уравнений (1) и (2) по бесконечно малому времени скачка концентрации получаем соответственно граничные условия для случая увеличения концентрации носителей:

$$j(t_1^+) = j(t_1^-) \tag{3}$$

и случая её уменьшения:

$$j(t_2^+) / j(t_2^-) = \sqrt{N(t_2^+) / N(t_2^-)}, \tag{4}$$

(t_1 – момент инжекции и t_2 – момент удаления носителей). В случае ступенчатых периодических изменений концентрации носителей граничные условия (3) и (4) должны применяться поочерёдно.

На основе полученных уравнений была исследована трансформация плазмона на графене при периодической модуляции во времени концентрации носителей. Рассмотрены случаи быстрой (по сравнению с периодом плазмона) ступенчатой и медленной синусоидальной модуляции. Опровергнут предсказанный в работах [1, 2] эффект параметрического усиления плазмонов.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ (0729-2020-0035).

Список литературы

1. Wilson J., Santosa F., Min M., Low T. // Phys. Rev. B. 2018. V. 98. P. 081411.
2. Wilson J., Santosa F., Martin P.A. // SIAM J. Appl. Math. 2019. V. 79. P. 1051-1074.

К.В. БУХЕНСКИЙ, А.Б. ДЮБУА, А.Н. КОНЮХОВ,
С.И. КУЧЕРЯВЫЙ[1], А.С. САФОШКИН[1]
Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина
[1]Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ГРАФЕНОВЫХ СТРУКТУРАХ

В работе рассмотрен процесс дифракции ТМ-поляризованной электромагнитной волны гауссова пучка на многослойной графеновой структуре с учётом нелинейности диэлектрической проницаемости графена. В рамках исследования развит модовый метод расчёта процесса взаимодействия излучения со структурой, позволяющий рассчитывать потоки энергий, возникающих в процессах дифракции.

K.V. BUKHENSKY, A.B. DUBOIS, A.N. KONUKHOV,
S.I. KUCHERYAVYY[1], A.S. SAFOSHKIN
Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin
[1]National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

PROPAGATION OF ELECTROMAGNETIC RADIATION IN GRAPHENE STRUCTURES

The paper examines the process of diffraction of a TM-polarized electromagnetic wave of a Gaussian beam on a multilayer graphene structure, taking into account the nonlinearity of the dielectric constant of graphene. As part of the study, a modal method for calculating the process of interaction of radiation with a structure has been developed, which makes it possible to calculate energy fluxes arising in diffraction processes.

Открытие графена и создание терагерцовых лазеров на графене [1] стимулировали теоретические [2] и экспериментальные [3] исследования процессов перераспределения электромагнитных волн на планарных структурах. Однако даже в самом простом приближении решение уравнений Максвелла при заданных граничных и краевых условиях приводит к громоздким интегродифференциальным уравнениям [4], которые имеют строго аналитическое решение только для определённых геометрий структур [5].

В работе [5] был развит модовый метод исследования задач дифракции электромагнитного излучения на диэлектрическом барьере. Основным

достоинством этого метода является сведение интегральных дифракционных уравнений к системе алгебраических, которые дают информацию, как о поверхностных, так и объёмных полях, возбуждаемых в структуре [6]. В данной работе этот метод был использован для расчёта процессов отражения поверхностной волны от вертикального диэлектрического барьера. Рассматриваемая структура представляет собой четыре области, характеризующиеся диэлектрическими проницаемостями ε_1 – вакуум, $\varepsilon_2(\omega)$ – металл, $\varepsilon_3(\omega)$ – графен, ε_4 – диэлектрик (рис. 1).

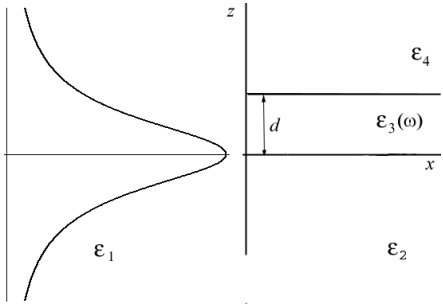


Рис. 1. Схема дифракции при нормальном падении электромагнитной волны на диэлектрический барьер

Уравнения Максвелла $i\omega\mathbf{H} = c\cdot\mathrm{rot}\mathbf{E}$ и $i\omega\varepsilon_i(\omega)\mathbf{E} = -c\cdot\mathrm{rot}\mathbf{H}$ в декартовой системе в совокупности с гармоническим характером распространения каждой моды вдоль оси X $\{\mathbf{H}(x, z), \mathbf{E}(x, z)\} = \{\mathbf{H}(z), \mathbf{E}(z)\}\exp(ik_x x)$ связывают компоненты мод ТМ-поляризованного излучения (E_x, E_z, H_y). Огибающие моды $H(z)$, а также волновое число k_x определяются из волнового уравнения и граничных условий. Волновое уравнение даёт зависимость поля $H_y(z)$ для каждого из квадрантов с граничными условиями $H_y(z = -0) = H_y(z = +0)$, $E_x(z = -0) = E_x(z = +0)$, которые полностью определяют структуру каждой моды при $x < 0$ и $x > 0$ в каждой из областей.

Список литературы

1. Chakraborty S., et al. // Science. 2016. V. 351. No. 6270. P. 246-248.
2. Shah Sh. et al. // Phys. Rev. Applied. 2018. V. 10. No. 3. P. 034025.
3. Afinogenov B.I., et al. // Phys. Rev. Applied. 2018. V. 9. No. 2. P. 024027.
4. Бухенский К.В. и др. // Журнал Средневолжского математического общества. 2017. Т. 19. № 3. С. 73-81.
5. Bukhensky K.V., et al. // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. 2022. V. 15(6). P. 742-752.
6. Бухенский К.В. и др. // Ученые записки Физического факультета Московского Университета. 2003. № 1. С. 2310301.

УДК 535(06)+004(06)

В.Ю. ЖЕЛЕЗНОВ, Т.В. МАЛИНСКИЙ, В.Е. РОГАЛИН,
Ю.В. ХОМИЧ, И.А. КАПЛУНОВ[1], А.И. ИВАНОВА[1],
А.А. ШАЙКИН[2], С.Е. СТУКАЧЕВ[2], А.А. СЕРГЕЕВ[3], С.В. ИВАКИН[3]
Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург
[1]Тверской государственный университет
[2]Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
[3]Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург

ВЛИЯНИЕ ВОДНОЙ СРЕДЫ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ НАНОСЕКУНДНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ НЕОДИМОВОГО ЛАЗЕРА НА ПОЛИРОВАННУЮ ПОВЕРХНОСТЬ БЕСКИСЛОРОДНОЙ МЕДИ

Сопоставлены результаты воздействия наносекундного Nd-лазера при плотности энергии 20 - 50 Дж/см^2 на поверхность бескислородной меди в водной среде с использованием чёрного защитного покрытия толщиной 200 мкм. В пятне возникало обширное углубление до 3 - 5 мкм.

V.Yu. ZHELEZNOV, T.V. MALINSKIY, V.E. ROGALIN,
Yu.V. KHOMICH, I.A. KAPLUNOV[1], A.I. IVANOVA[1],
A.A. SHAYKIN[2], S.E. STUKACHEV[2], A.A. SERGEEV[3], S.V. IVAKIN[3]
Institute for Electrophysic, and Electric Power Engineering of tke RAS, Saint-Petersburg
[1]Tver State University
[2]Institute of Applied Physics of the RAS, Nizhny Novgorod
[3]Baltic State Technical University "VOENMECH", Saint-Petersburg

INFLUENCE OF AQUATIC ENVIRONMENT ON THE EFFECTIVENESS OF IMPACT OF NANOSECOND PULSES OF NEODYMIUM LASER ON A POLISHED SURFACE OF OXYGEN-FREE COPPER

The results of impact to a nanosecond Nd laser at an energy density of 20 - 50 J/cm^2 on the surface of oxygen-free copper and an aqueous environment using a black protective coating 200 microns thick are compared. A large depression of up to 3 - 5 microns appeared in the spot.

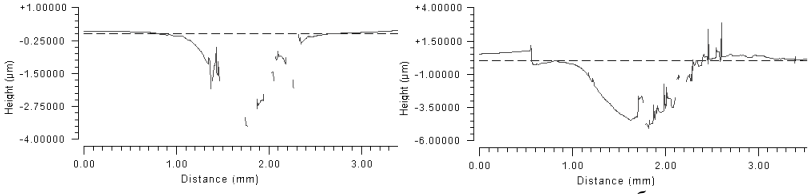
В различных отраслях науки и техники медь активно используется благодаря высоким значениям тепло- и электропроводности. Этому способствуют отсутствие фазовых переходов в конденсированном

состоянии, кубическая кристаллическая решётка, высокие плотность упаковки атомов и химическая чистота. В [1, 2] сообщено о поведении меди и её сплавов при воздействии наносекундным УФ-лазером в воздухе и об обнаружении оптикопластического эффекта. В данной работе исследования меди продолжены с помощью более мощного Nd-лазера, причём не только в воздушной, но и водной среде.

Исследовалась полированная бескислородная медь. Энергия импульса составляла – 0.5 - 1.0 Дж; её плотность варьировалась в диапазоне – 20 - 50 Дж/см^2, длительность 10 - 16 нс. Образцы размещались в пластиковой кювете под слоем воды ~ 1 мм. Деградационные эффекты при абляции, на части образцов ослаблялись покрытием из чёрного пластика толщиной ~ 200 мкм (остаточное отражение ~ 1 %). До и после воздействия образцы исследовались на оптическом профилометре NewView 7300 (Zygo, США), и сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM 6610LV с приставкой для энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии.

При воздействии возникал плазменный факел, локализованный водой. В зоне пятна генерировалось обширное углубление до 3 - 5 мкм. В случае использования поглощающего покрытия значительные повреждения меди не наблюдались, тогда, как в его отсутствие на стенках углубления наблюдались следы плавления, испарения и последующей кристаллизации поверхностного слоя. На рис. 1 сопоставлены профилограммы лазерных пятен на поверхности меди с покрытием и без, полученные в воде при плотности энергии 32 Дж/см^2.

Работа выполнена в рамках государственного задания по научной деятельности № 75-03-2022-056, № 0817-2023-0006 и FFUF-2021-0015 с использованием ресурсов ЦКП ТвГУ и ИПФ РАН.



а *б*

Рис. 1. Профилограммы лазерных пятен на поверхности Cu в воде, плотность энергии 32 Дж/см^2, без покрытия (*а*), с покрытием (*б*)

Список литературы

1. Малинский Т.В., Рогалин В.Е., Ямщиков В.А. // ФММ. 2023. Т. 123 (2). С. 192.
2. Малинский Т.В., Рогалин В.Е. и др. // ФММ. 2022. Т. 124 (7). С. 653.

УДК 535(06)+004(06)

Е.Д. МИНАЕВА, В.И. ЮСУПОВ, Н.В. МИНАЕВ
Институт фотонных технологий ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Троицк

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ВОДЫ В ПОЛИМЕРНЫХ МИКРОЧАСТИЦАХ НА КАЧЕСТВО СПЕКАНИЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ТРЁХМЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ ПОВЕРХНОСТНО-СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ

В работе представлены результаты сравнения спекания различных микрочастиц полимера полилактида методом поверхностно-селективного лазерного спекания (ПСЛС) при различном содержании воды на поверхности микрочастиц и в их объёме. Четыре типа микрочастиц, изготовленных методом механического помола, были использованы: без модификаций, лиофилизированные, с дополнительным увлажнением непосредственно перед лазерным воздействием и покрытые природным полисахаридом хитозаном с дополнительным увлажнением непосредственно перед лазерным воздействием. Проанализирована условная степени спекания каждого типа микрочастиц по СЭМ-изображениям поверхностей структур, сформированных из них.

E.D. MINAEVA, V.I. YUSUPOV, N.V. MINAEV
Institute of Photonic Technologies FSRC «Crystallography and Photonics» of the RAS, Troitsk

STUDY OF THE EFFECT OF WATER CONTENT IN POLYMER MICROPARTICLES ON THE QUALITY OF SINTERING DURING FORMATION OF THREE-DIMENSIONAL CONSTRUCTIONS USING SURFACE-SELECTIVE LASER SINTERING METHOD

The study presents the results of comparing the sintering of different types of polylactide microparticles using the surface-selective laser sintering (SSLS) method at different water contents on the surface and inside the microparticles. Four types of mechanically milled microparticles were used: unmodified, lyophilized, with additional moisture added just before laser treatment and coated with natural polysaccharide chitosan with additional moisture added just before laser treatment. The sintering grade of each type of microsphere was analyzed based on SEM-images of the surfaces of the structures.

Метод поверхностно-селективного лазерного спекания (ПСЛС) относится к технологиям аддитивного производства и позволяет изготавливать конструкции различной формы и архитектоники. Используя биосовместимые материалы, одобренные для медицинских применений, этим методом можно формировать конструкции для задач тканевой инженерии.

Спекание рабочего материала в режиме ПСЛС происходит не напрямую, как в классическом СЛС, а благодаря локализации энергии лазерного излучения сенсибилизатором нагрева. Сенсибилизатор нагрева наносится на поверхность спекаемого материала на этапе его синтеза или перед лазерным воздействием. Параметры и компоненты лазерной системы подбираются таким образом, чтоб коэффициент поглощения сенсибилизатора нагрева превышал коэффициент поглощения спекаемого полимерного материала на порядок-два на рабочей длине волны лазерного излучения. В этой работе такое условие достигается за счёт использование воды. Целью работы являлось исследование влияния содержания воды как на поверхности, так и во внутреннем объёме полимерных микрочастиц на качество их спекания в процессе формирования трёхмерных структур методом ПСЛС. На рис. 1 схематично представлены четыре типа микрочастиц, использованных в работе: без модификаций, лиофилизированные, с дополнительным увлажнением непосредственно перед лазерным воздействием и микрочастицы, покрытые природным полисахаридом хитозаном с дополнительным увлажнением непосредственно перед лазерным воздействием.

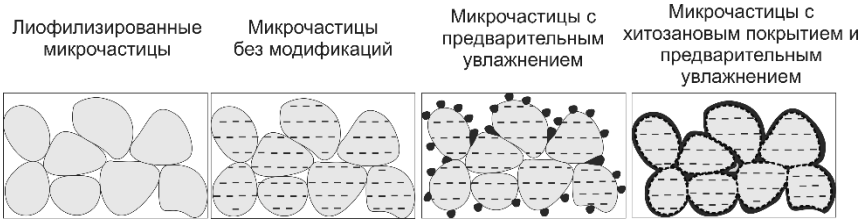


Рис. 1. Схематичное представление типов микрочастиц, использованных в работе, тёмно-серым (в том числе пунктир) отмечена вода

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в части развития лазерных аддитивных технологий.

УДК 535(06)+004(06)

Я.Р. ШУБИН[1], А.Г. РАЗДОБАРИН[1,2], А.А. БЕЛОКУР[1],
Д.И. ЕЛЕЦ[1,2], О.С. МЕДВЕДЕВ[1,2], Е.В. СМИРНОВА[1],
Л.А. СНИГИРЕВ[1]
[1]*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург*
[2]*Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград*

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА ЛАЗЕРНЫХ ДИАГНОСТИК ПЕРВОЙ СТЕНКИ В ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВКАХ

Приведены результаты компьютерного моделирования оптической схемы комплекса лазерных диагностик первой стенки токамак-реакторов на основе методов LIDAR, двухволновая цифровая голография (ДВЦГ) и активная лазерная ИК-термография (АЛИТ). По полученной модели дана оценка разрешающей способности и радиометрическая оценка энергоэффективности диагностик.

I.R. SHUBIN[1], A.G. RAZDOBARIN[1,2], A.A. BELOKUR[1], D.I. ELETS[1,2],
O.S. MEDVEDEV[1,2], E.V. SMIRNOVA[1], L.A. SNIGIREV[1]
[1]*Ioffe Physical Technical Institute of the RAS, Saint-Petersburg*
[2]*Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad*

DESIGN OF LASER-BASED DIAGNOSTIC SYSTEM OF THE FIRST WALL IN FUSION DEVICES

Presents the result of computer-aided design of optical layout for a laser-based diagnostic system of tokamak-type fusion devices' first wall involving LIDAR, two-wave digital holography (TWDH) and active laser IR-thermography (ALIRTh) technologies. Gives assessment of the system's resolving power and radiometric efficiency assessment based on data acquired from the model.

Разработка диагностик первой стенки является важным шагом развития термоядерных установок следующего поколения. В условиях длительных разрядов и высокой энергонагруженности, тепловые нагрузки на обращённые к плазме элементы могут приводить к развитию рельефа поверхности внутренней облицовки с отличными от основного объёма теплофизическими и электрическими свойствами и сложной морфологией [1, 2], что может негативно влиять на характеристики взаимодействия плазмы с первой стенкой [3, 4].

Целью работы является разработка самосогласованной сканирующей лазерной метрологической системы высокого разрешения на основе лидар-дальнометрии (LIDAR), двухволновой цифровой голографии

(ДВЦГ) и активной лазерной ИК-термографии (АЛИТ). На рис. 1 представлена блок-схема разрабатываемой системы. LIDAR позволяет получать представление об абсолютной дистанции до исследуемой области и перестраивать две другие диагностики по фокусу. ДВЦГ на основе анализа интерферограмм позволяет строить карту рельефа поверхности, в то время как по данным термографии строятся карты тепловых потоков, позволяющие обнаружить присутствие трещин и прочих терморезистивных дефектов поверхности первой стенки.

Расчёт и оптимизация оптической схемы в программном пакете ZEMAX позволили нивелировать вклад ошибки волнового фронта в определение дистанции методом LIDAR, а в случае ДВЦГ и термографии формировать дифракционно-ограниченное изображение с латеральным разрешением не хуже 0,2 мм и 0,8 мм, соответственно на всех дистанциях фокусировки. На базе экспериментально измеренной функции распределения отражения была дана радиометрическая оценка энергоэффективности методов LIDAR и ДВЦГ в пересчёте на 1 Вт мощности источников излучения: не менее 10^{15} и 10^{3} фотонов/с/пиксель, соответственно. Для термографии была получена кривая потока фотонов на пиксель в зависимости от длительности импульса нагрева.

Полученные из модели данные открывают путь к реализации комплекса диагностик и дальнейшей разработке инженерных решений для применения в термоядерных установках нового поколения.

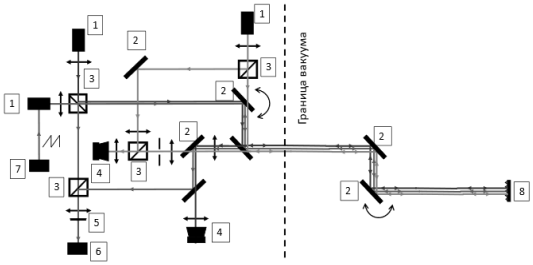


Рис. 1. Блок-схема диагностической системы контроля состояния первой стенки токамак-реактора: 1 – лазерные источники, 2 – поворотные зеркала, 3 – лучеделители, 4 – приёмники излучения, 5 – лавинный фотодиод, 6 – частотомер, 7 – задающий генератор

Список литературы

1. De Temmerman G., Hirai T., et al. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2018. V. 60, P. 044018.
2. Schweer B., Huber A., et al. // J. Nucl. Mater. 2005. V. 337-339. P. 570-574.
3. Autricque A., Peillon S., et al. // Nucl. Mater. Energy. 2018. V. 17. P. 284-288.
4. Cohen R., Ryutov D. // Physics of Plasmas. 1998. V. 5. P. 2194.

УДК 535(06)+004(06)

Н.А. КАПРИДОВ[1,2], А.Е. ШИТИКОВ[1], К.Н. МИНЬКОВ[1],
А.В. МАСАЛОВ[1,4], Д.А. ЧЕРМОШЕНЦЕВ[1,2,3], А.И. ЛЬВОВСКИЙ[1],
И.А. БИЛЕНКО[1,5]

[1]Российский квантовый центр, Сколково
[2]Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет), Долгопрудный
[3]Сколковский институт науки и технологий
[4]Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва
[5]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

МЕТОДИКА ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ МГНОВЕННОЙ И ДОЛГОВРЕМЕННОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ЧАСТОТЫ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Приведены результаты активной стабилизации частоты полупроводникового лазера с использованием эффекта Зеемана. Приведена схема затягивания частоты лазера на кристаллический резонатор.

N.A. KAPRIDOV[1,2], A.E. SHITIKOV[1], K.N. MINKOV[1],
A.V. MASALOV[1,4], D.A. CHERMOSHENTSEV[1,2,3], A.I. LVOVSKY[1],
I.A. BILENKO[1,5]

[1]Russian Quantum Center, Skolkovo
[2]Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny
[3]Skolkovo Institute of Physics and Technology
[4]Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow
[5]Lomonosov Moscow State University

THE TECHNIQUE OF INSTANTANEOUS AND LONG-TERM STABILITY OF THE FREQUENCY OF LASER RADIATION

The results of active stabilization of the semiconductor laser frequency using the Zeeman effect are presented. The scheme of laser frequency tightening on a crystal resonator is given.

Частота источника лазерного излучения со временем претерпевает дрейф и флуктуации из-за его взаимодействия с окружением, что является критичным для многих научных и практических приложений.

Целью данной работы является осуществление мгновенной и долговременной стабильности частоты излучения лазерного диода. Для достижения мгновенной стабильности частоты используется эффект

затягивания лазерного диода на высокодобротный кристаллический резонатор [1]. Суть эффекта заключается в реализации системы обратной связи за счёт использования резонансно усиленного рэлеевского рассеяния в среде резонатора, возвращаемого в диод. В результате, эффект приводит существенному сужению ширины линии излучения лазера и подавлению частотных шумов.

В предыдущих исследованиях были затянуты различные типы диодов, однако диоды типа VCSEL (vertical-cavity surface-emitting laser) до сих пор ни разу не затягивали в классических схемах.

Для проведения эксперимента была собрана установка с призменным элементом связи излучения и резонатором из фторида магния (MgF_2). Добротность резонатора, измеренная методом звона (рис. 1, слева), оказалась равной $(4.8\pm0.2)\cdot10^8$.

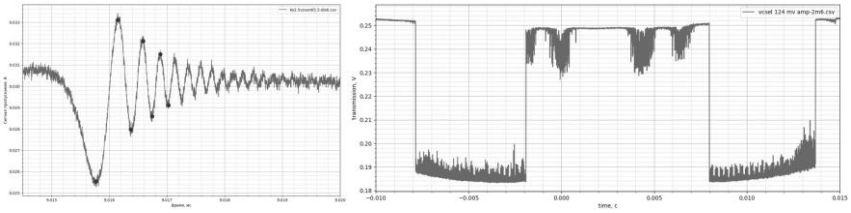


Рис. 1. Измерение добротности резонатора методом звона

Лазерный диод типа VCSEL был затянут на этот резонатор, о чём свидетельствуют вертикальные стенки мод резонатора в спектре пропускания системы (рис. 1, справа).

В дальнейшем частота диода может быть дополнительно стабилизирована методом привязки к линии поглощения рубидия [2]. Данный был реализован и показал долговременную стабильность на уровне ± 1 МГц от частоты линии рубидия.

Список литературы

1. Vassiliev V.V., Velichansky V.L., Ilchenko V.S., Gorodetsky M.L., Hollberg L., Yarovitsky A.V. Narrow-line-width diode laser with a high-Q microsphere resonator // Optics Communications. 1998. V. 158. P. 305-312.

2. Corwin K.L., et al. Frequency-stabilized diode laser with the Zeeman shift in an atomic vapor // Applied Optics. 1998. V. 37. No. 15. P. 3295-3298.

УДК 535(06)+004(06)

В.К. УРЮПИНА[1,2], С.П. КОТОВА[1,2], Н.Н. ЛОСЕВСКИЙ[2],
А.М. МАЙОРОВА[2], К.А. ЦЕЛОГОРОДЦЕВ[1,2]
[1]Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева
[2]Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

ФОРМИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ КОНФИГУРАЦИЙ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С ФИКСАЦИЕЙ НА ПОДЛОЖКЕ В СХЕМЕ ОПТОТЕРМИЧЕСКОЙ ЛОВУШКИ

Приведены результаты экспериментов по оптическому и оптотермическому манипулированию биологическими клетками. Эксперименты доказали возможность организации клеток в различные формы, такие как кольцо, квадрат и решётка нулей, с последующей фиксацией на подложке с использованием раствора альбумина и кратковременного увеличения мощности лазера.

V.K. URYUPINA[1,2], S.P. KOTOVA[1,2], N.N. LOSEVSKY[2],
A.M. MAYOROVA[2], K.A. TSELOGORODTSEV[1,2]
[1]Samara National Research University
[2]Samara Branch of Lebedev Physical Institute of the RAS

FORMATION OF COMPLEX CONFIGURATIONS OF BIOLOGICAL OBJECTS WITH FIXATION ON A SUBSTRATE IN THE SCHEME OF AN OPTOTHERMAL TRAP

The paper presents the results of experiments on optical and optothermal manipulating biological cells. The experiments proved a capability to organize microobjects into various shapes, such as a ring, a square boundary and a lattice of zeros, with their followed fixation on a substrate using an albumin solution and short-term increasing laser power.

Оптотермическая ловушка основывается на комбинации оптического и теплового эффектов для захвата микроскопических частиц [1]. Оптическая сила приводит к возникновению оптического захвата, а градиент температуры, вызванный тепловыми эффектами, приводит к возникновению конвекционных потоков, переносящих микрообъекты.

В последние годы оптотермические ловушки находят широкое применение в научных исследованиях и медицине для захвата и манипулирования микроскопическими объектами, такими как бактерии,

вирусы, молекулы ДНК и белки. Они позволяют изучать механические свойства объектов и их взаимодействие с другими объектами и окружающей средой [2]. Особый интерес они представляют в медико-биологических исследованиях, связанных с фиксацией микрообъектов на подложках.

В данной работе проведено экспериментальное исследование оптотермического захвата, удержания и фиксации на подложке различных биологических объектов в заданных конфигурациях. Световые поля сложной конфигурации были рассчитаны методами оптики спиральных пучков и сформированы с помощью ЖК ПМС. Эксперименты проводились на установке оптотермической ловушки, описанной подробно в работе [3]. В качестве исследуемых объектов использовались латексные микросферы, с которыми уже был проведён ряд экспериментов [4], а также биологические объекты, погружённые в раствор альбумина.

Процедура манипуляции и фиксации биологическими микрообъектами включала следующие этапы, показанные на рис. 1.

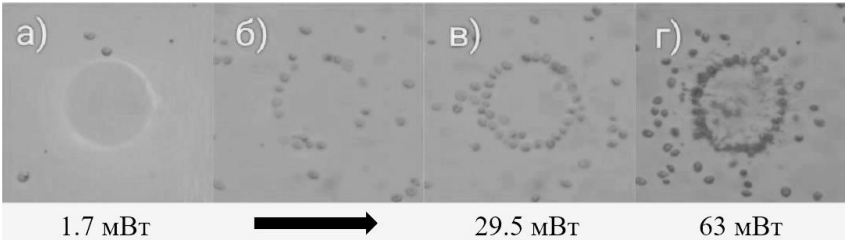


Рис. 1. Оптотермический захват и фиксация клеток дрожжей в сложной конфигурации: формирование светового поля (а); нагрев подложки, притяжение микрообъектов за счёт конвективных потоков (б); захват микрообъектов световым полем (в); фиксация частиц на подложке за счёт коагуляции альбумина (г)

Результаты экспериментов указывают на перспективность метода для исследования механических свойств биологических объектов и фиксации биологических структур в определенной конфигурации.

Список литературы

1. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35832388/.

2. Ding H., Chen Zh., Poncea C., Zheng Yu. // Chem. Commun. 2023. V. 59. P. 2208-2221.

3. Котова С.П., Лосевский Н.Н., Майорова А.М., Разуева Е.В., Самагин С.А. // Известия РАН. Серия физическая. 2022. Т. 86. № 12. С. 1685-1689.

4. Коробцов А.В., Котова С.П., Лосевский Н.Н., Майорова А.М., Самагин С.А. // Квантовая электроника. 2022. Т. 52. С. 856-861.

УДК 535(06)+004(06)

А.А. КРИВЕЦКАЯ[1,2], Д.М. КУСТОВ[1], В.В. ЛЕВКИН[3], А.С. ГОРБУНОВ[3], В.Д. ПАРШИН[3], М.А. УРСОВ[3], С.В. ОСМИНИН[3], Е.В. ЕВЕНТЬЕВА[3], Ф.П. ВЕТШЕВ[3], Т.А. САВЕЛЬЕВА[1,2]

[1]Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва
[2]Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
[3]Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова

ИНТРАОПЕРАЦИОННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИКО-СПЕКТРАЛЬНОГО МЕТОДА ОЦЕНКИ САТУРАЦИИ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ КИСЛОРОДОМ

Представлено описание разработанного метода оценки сатурации биологических тканей кислородом методом спектроскопии диффузного рассеяния. Приведены результаты интраоперационных измерений во время хирургических процедур с формированием анастомоза.

A.A. KRIVETSKAYA[1,2], D.M. KUSTOV[1], V.V. LEVKIN[3], A.S. GORBUNOV[3], V.D. PARSHIN[3], M.A. URSOV[3], S.V. OSMININ[3], E.V. EVENTEVA[3], F.P. VETSHEV[3], T.A. SAVELIEVA[1,2]

[1]Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow
[2]National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)
[3]Sechenov First Moscow State Medical University

INTRAOPERATIVE APPLICATION OF OPTICAL-SPECTRAL METHOD FOR ASSESSING OXYGEN SATURATION OF BIOLOGICAL TISSUES

A description of the developed method for assessing the saturation of biological tissues with oxygen by diffuse scattering spectroscopy is provided. The results of intraoperative measurements during surgical procedures with the formation of an anastomosis are presented.

Риск возникновения послеоперационных осложнений, таких как несостоятельность анастомоза, зависит от уровня кровоснабжения сшиваемых тканей [1]. Соответственно, осуществление объективной количественной оценки состояния биологических тканей должно повысить частоту положительных исходов хирургических операций.

Целью данной работы является проведение клинических измерений сатурации тканей различных органов кислородом для оценки степени их кровоснабжения.

Оценка уровня сатурации органов проводилась при помощи метода спектроскопии диффузного рассеяния. Оборудование, используемое в данной работе, включает спектрометр «ЛЭСА-01-БИОСПЕК», источник широкополосного излучения в видимом диапазоне, оптические волокна и ПК с программой «UnoMomento». Исследуемые органы включают пищевод, желудок, толстую кишку, ткани груди и трахею.

Оценка сатурации тканей кислородом производится путём обработки регистрируемого сигнала с помощью определенного алгоритма [2, 3]. В основном затухание сигнала в области 500 - 600 нм происходит за счёт поглощения света гемоглобином, что позволяет определить референсные значения коэффициента ослабления. Также рассчитываются экспериментальные значения коэффициента ослабления света путём вычисления логарифма отношения спектра, полученного от референсного отражателя, и сигнала, регистрируемого от исследуемого объекта. После этого производится сравнение референсных и экспериментальных величин, путём нахождения минимального значения суммы квадратов разности между ними по длинам волн определяется соотношение между концентрациями оксигенированной и редуцированной форм гемоглобина и происходит расчёт значения сатурации.

По результатам проведённого исследования, разработанный метод оценки сатурации биологических тканей кислородом был апробирован в клинических условиях на тканях толстой кишки [3], груди [4], пищевода, желудка и трахеи. По сопоставлению результатов измерений сатурации на нескольких этапах во время операции были сделаны выводы об изменении степени кровоснабжения исследуемых тканей. Также было проведено сопоставление полученных значений сатурации с наличием послеоперационных осложнений.

Можно сделать вывод, что представленная методика оценки кровоснабжения тканей путём оценки тканевой сатурации методом спектроскопии диффузного рассеяния может применяться в операционных условиях для объективной оценки состояния сшиваемых тканей в режиме реального времени.

Список литературы

1. Clancy N., Arya S., et al. // Biomedical optics express. 2015. V. 6 (10). P. 4179-4190.
2. Stratonnikov A.A., Loschenov V.B. // J. Biomed. Opt. 2001. V. 6(4).
3. Kustov D.M., Savelieva T.A., et al. // Photonics. 2021. V. 8. P. 427.
4. Kustov D.M., Krivetskaya A.A., et al. // Photonics. 2022. V. 9. P. 821.

УДК 535(06)+004(06)

Д.П. СУДАС, Г.Г. ЯКУЩЕВА, П.И. КУЗНЕЦОВ
Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗОНАНСА ЗАТУХАЮЩЕЙ МОДЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ХИМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ПОКРЫТИЙ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

Сенсорная система основана на эффекте резонанса затухающей моды в утонённом многомодовом волокне с тонкоплёночным покрытием. Химически стойкая тонкая плёнка оксида алюминия наносилась на кварцевую поверхность оптического волокна методом химического парофазного осаждения из металлорганических соединений (MOCVD). По движению, форме и глубине нескольких порядков резонансов оценивали оптические параметры осаждаемого покрытия при различных условиях синтеза в температурном диапазоне от 470 до 550 °С. Продемонстрирована зависимость между температурой синтеза покрытий и скорости растворения их в ортофосфорной кислоте. Максимальная чувствительность реализованных датчиков для сред с показателями преломления 1.34 до 1.37 составила 2950 нм/единицу показателя преломления.

D.P. SUDAS, G.G. YAKUSCSHEVA, P.I. KUZNETSOV
Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS

USING LOSSY MODE RESONANCE TO CONTROL THE CHEMICAL RESISTANCE OF ALUMINUM OXIDE COATINGS

The sensing system is based on the effect of lossy mode resonance in a thin film coated multimode fiber. A chemically resistant thin film of aluminum oxide was deposited onto the quartz surface of an optical fiber using metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD). Based on the motion, shape, and depth of several orders of resonance, the optical parameters of the deposited coating were assessed under various synthesis conditions in the temperature range from 470 to 550 °C. The relationship between the temperature of coating synthesis and the rate of their dissolution in orthophosphoric acid has been demonstrated. The maximum sensitivity of the implemented sensors for media with refractive indices 1.34 to 1.37 was 2950 nm/RIU.

В настоящее время одним из популярных типов реализации рефрактометров является волоконный световод с тонкоплёночным покрытием использующий эффект резонанса затухающей моды (LMR) [1]. Спектральное положение максимума резонанса в спектре пропускания

зависит от толщины плёнки, а также величин показателей преломления волновода, самого покрытия и окружающей среды [2]. При этом некоторые материалы покрытия обладают свойствами, позволяющими их более эффективно использовать в определённых средах или при контроле отдельных параметров [3].

Подготовив серию утонённых многомодовых волокон с диаметром около 80 мкм и длиной 2 мм, на их поверхность были синтезированы покрытия Al_2O_3 при разных температурах. Сечения спектра пропускания на длине волны 400 нм в процессе синтеза покрытий показаны на рис. 1. Для определения стойкости получаемого материала к H_3PO_4, была проведена серия экспериментов по травлению сенсоров, созданных при разных температурах синтеза.

Так как оптические константы покрытия известны, то по положению резонанса в спектре пропускания удалось пересчитать смещение максимума резонанса в уменьшение толщины. При температуре (520 °C), используемой для дальнейшего создания сенсоров при травлении, не меняется форма резонанса. Стойкость покрытия к травлению изменяется в 9 раз и достигает минимума при 550 °C (рис. 2). Увеличение температуры синтеза приводит к большему количеству кристаллитов и общей кристалличности покрытия, тем самым меняя стойкость к травлению.

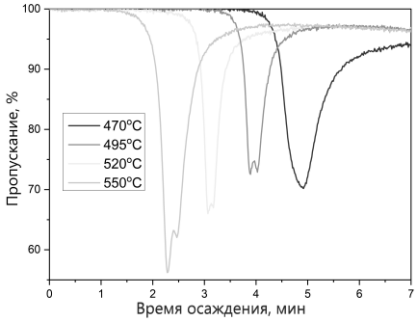


Рис. 1. Сечение спектров пропускания при синтезе

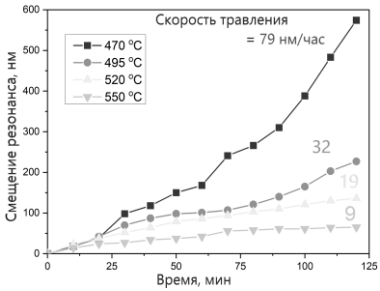


Рис. 2. Зависимости положения LMR при травлении сенсоров

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (№ 075-01110-23-01).

Список литературы

1. Zhao Y. // Opt. Express. 2013. V. 21, P. 26136-26143.
2. Arregui F.J., et al // Sens. Actuators B. 2016. V. 232, P. 660-665.
3. Del Villar I., et al // Sens. Actuators B. 2017. V. 240. P. 174-185.

УДК 535(06)+004(06)

С.М. АРАКЕЛЯН, Д.Н. БУХАРОВ, А.И. ЗОТОВ
Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛЁНКИ МЕТОДОМ BOXCOUNT

Представлен метод получения биметаллических тонких плёнок посредством осаждения капель коллоидов золота и серебра под воздействием непрерывного лазерного луча, ультразвука и центрифуги. Высчитана на определенном агрегате фрактальная размерность методом boxcount. Анализировано значение пропускания света биметаллических плёнок.

S.M. ARAKELYAN, D.N. BUKHAROV, A.I. ZOTOV
Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs

DETERMINATION OF OPTICAL PROPERTIES OF BIMETALLIC FILM USING THE BOXCOUNT METHOD

The method of bimetallic thin films production by deposition of gold and silver colloid droplets under the influence of continuous laser beam, ultrasound and centrifuge is presented. The fractal dimensionality was calculated on a certain aggregate by the boxcount method. The value of light transmission of bimetallic films was analyzed.

Получение тонких плёнок является сложной в области нанофотоники. С ними связана трудность с управлением оптических свойств, возникающими при производстве таких материалов. Капельное осаждение коллоидных частиц представляется потенциальным решением этой проблемы.

Металлические частицы осаждались на площади контакта капли со стеклянной подложкой. Капли во время испарения под воздействием силы натяжения, преобладая над силами тяжести, образуют сферическую форму. В таком состоянии они препятствовали смещению границы раздела фаз, а их площадь не менялась. В качестве материала использованы дисперсные наночастицы золота (Au) и серебра (Ag) размером 10 нм в пропорции 50 % каждый. Лазер мощностью $P = 2$ Вт и интенсивностью $\rho \leq 10^6$ Вт/см$^{-2}$ бомбардировал мишень в течение 30 мин. Диаметр лазерного пучка составлял $d_r = 100$ мкм, а скорость воздействия $v = 100$ пм/с. Полученный раствор подвергался ультразвуку около 10 мин. Затем раствор был помещён в лабораторную центрифугу марки СМ-6М.

Размеры биметаллических коллоидных частиц исследовались в дальнейшем методом динамического рассеяния света анализатором Horiba LB-550. Благодаря функции температурного контроля (70 - 80 C°), частицы оставались стабильными и имели размер в диапазоне от 5 до 10 нм. При отклонении некоторых параметров Au:Ag-плёнка отличалась от заявленных параметров и образовывала сложные структуры [1]: ветвистую, коховскую и другие формы. Следовательно, биметаллические структуры плёнки могут обладать морфологическими свойствами. На рис. 1 изображён снимок растрового микроскопа одного из участка плёнки. Стохастическая размерность определялась с помощью метода boxcount [2]. Изображение разбивалось на ячейки (L = 1 мкм) и принимала вид двоичной системы. В зависимости от насыщенности ячейки ($i \geq 80$ %), её можно считать заполненной (единица) или пустой (ноль). Соответственно, эта форма информации подавалась в машинную программу и обрабатывалась. На рис. 2 показан вид такой системы.

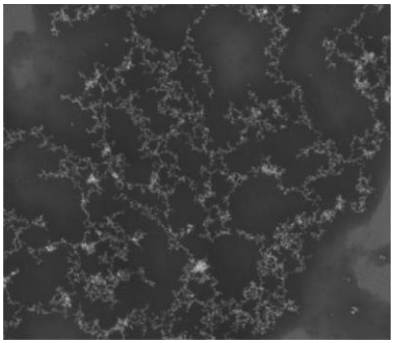


Рис. 1. Морфология биметаллической ветвистой плёнки [1]

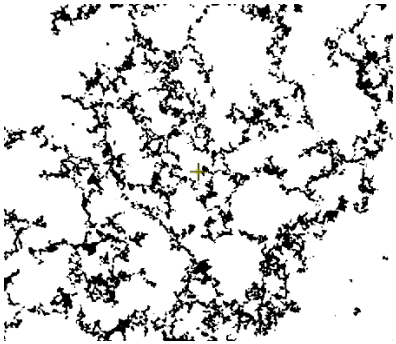


Рис. 2. Поверхностный кластер с размерностью D = 1.656 ± 0.1308

Каждый агрегат плёнки обладал уникальными оптическими свойствами, зависящими от рассеяния D. Благодаря уравнению, представленному в работе [3], были найдены значения пропускания R. Средние показатели плёнки составили от 400 - 540 нм.

Список литературы

1. Antipov A.A., Bukharov D.N., Arakelyan S.M., Osipov A.V., Lelekova A.A. Bimetallic clustered thin films with variable electro-optical properties // Journal of Physics: Conference Series. 2018. V. 951. P. 012013.

2. Moisy F. Computing a fractal dimension with Matlab: 1D, 2D and 3D Box-counting, https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/13063-boxcount/content/boxcount/html/demo.html.

3. Смирнов Б.М. Фрактальные кластеры // УФН. 1986. Т. 149. № 2. С. 177-219.

УДК 535(06)+004(06)

Р.И. КУЦ, Д.А. БЕЛОУСОВ, В.П. КОРОЛЬКОВ,
А.И. МАЛЫШЕВ, А.Р. САМЕТОВ
Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск

ПРИМЕНЕНИЕ ПРЯМОЙ ЛАЗЕРНОЙ ЗАПИСИ НА ДВУСЛОЙНЫХ ПЛЁНКАХ a-Si/Cr ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БИНАРНЫХ СИНТЕЗИРОВАННЫХ ГОЛОГРАММ

Представлены результаты экспериментального исследования прямой термохимической лазерной записи синтезированных голограмм на тонких плёнках s-Si/Cr. Дозированное лазерное воздействие в сочетании с двухэтапным селективным жидкостным травлением позволяет формировать амплитудные дифракционные структуры с различным коэффициентом отражения, делать их как пропускающими, так и непрозрачными. Дополнительное реактивное ионное травление и локальное маскирование фоторезистом позволяет формировать фазовые пропускающие синтезированные голограммы в сочетании с амплитудными настроечными элементами для интерференционного контроля асферической оптики. Приведены результаты практического применения новой технологии.

R.I. KUTS, D.A. BELOUSOV, V.P. KOROLKOV,
A.I. MALYSHEV, A.R. SAMETOV
Institute of Automation and Electrometry of the SB RAS, Novosibirsk

APPLICATION OF DIRECT LASER WRITING ON BI-LAYER A-SI/CR FILMS FOR THE PRODUCTION OF BINARY COMPUTER-GENERATED HOLOGRAMS

The results of an experimental study of the direct thermochemical laser writing of computer-generated holograms on thin s-Si/Cr films are presented. Dosed laser exposure in combination with two-stage selective liquid etching makes it possible to form amplitude diffraction structures with different reflectance, making them both transmitting and opaque. Additional reactive ion etching and local masking with photoresist allows the formation of phase-transmitting computer-generated holograms in combination with amplitude tuning elements for interference control of aspheric optics. The results of the practical application of the new technology are presented.

Технология прямой лазерной записи на тонких плёнках хрома широко применяется для создания дифракционных оптических элементов (ДОЭ) [1, 2]. Для задач интерферометрического контроля асферической оптики активно применяются широкоапертурные ДОЭ. Для данных элементов

зачастую требуется синтезировать на периферии структуры с пространственной частотой до 1000 лин/мм. В предыдущих исследованиях [3] нами была продемонстрирована новая технология прямой лазерной записи на тонких двуслойных плёнках a-Si/Cr, которая, за счёт более резкого энергетического порога и совокупности технологических процессов (термохимическая лазерная запись, жидкостное проявление) позволяет создавать структуры меньшего размера, по сравнению с прямой лазерной записью на однослойной плёнке Cr. Кроме того, важным преимуществом нанесения поверхностного слоя a-Si является возможность in-situ контроля характеристик записанного рисунка непосредственно на установке лазерной записи по изменению коэффициента отражения света, по сравнению с записью на однослойной плёнке Cr, где требуется проявление «скрытого изображения» в селективном жидкостном травителе.

В данной работе представлены результаты применения технологии прямой термохимичсекой лазерной записи бинарных синтезированных голограмм на двуслойной плёнке a-Si/Cr. Показано, что дозированное лазерное воздействие на плёнку a-Si/Cr в сочетание с последующим двухэтапным селективным жидкостным травлением (сначала неэкспонированных участков слоя a-Si, а за тем неэкспонированных участков плёнки Cr) позволяет формировать на подложке амплитудные дифракционные структуры с различным коэффициентом отражения, делать их как пропускающими, так и непрозрачными. При необходимости сформированный таким образом рисунок хромово-силицидной маски может быть перенесён в материал подложки с помощью реактивного ионного травления. Маскирование на этапе реактивного ионного травления части синтезированной голограммы фоторезистом позволяет формировать фазовые пропускающие синтезированные голограммы в сочетании с амплитудными настроечными элементами для интерференционного контроля асферической оптики. В работе представлены результаты исследования синтезированных голограмм.

Работа выполнена за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 22-79-00049).

Список литературы

1. Metev S.M., Veiko V.P., Savchenko S.G., et. al. Thermochemical action of laser radiation on thin metal films // Proc. IEEE Journ. Quant. Electr. 1981. V. 17. P. 2004-2007.

2. Zhao Q., Qiu J., et al., Direct writing computer-generated holograms on metal film by an infrared femtosecond // Optics Express. 2005. V. 13. P. 2089-2092.

3. Belousov D.A., Kuts R.I., Korolkov V.P. Thermochemical laser writing of silicide masks on dual-layer films a-Si/Cr // Proc. SPIE. 2023. V. 12762.

УДК 535(06)+004(06)

Л.Н. БОРОДИНА, А.В. ВЕНИАМИНОВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ЛАЗЕРНАЯ СКАНИРУЮЩАЯ МИКРОСКОПИЯ ФОТОИНДУЦИРОВАННЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ЛЮМИНЕСЦИРУЮЩИХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОЧАСТИЦ И МОЛЕКУЛ

Представлены результаты исследования диффузии люминесцирующих углеродных наночастиц с помощью модифицированного метода восстановления люминесценции после фотообесцвечивания sFRAP (Stripe-FRAP) с записью неоднородности в виде полосы сфокусированным лучом конфокального лазерного сканирующего микроскопа, который позволяет изучать множественные диффузионные процессы. Проведено сравнение результатов исследования изменения коэффициента диффузии исходной и трансформированной форм частиц методами sFRAP и голографической релаксометрии.

L.N. BORODINA, A.V. VENIAMINOV
ITMO University, Saint-Petersburg

LASER SCANNING MICROSCOPY OF PHOTOINDUCED TRANSFORMATIONS OF LUMINESCENT CARBON NANOPARTICLES AND MOLECULES

The results on diffusion of luminescent carbon nanoparticles using a modified Fluorescence Recovery After Photobleaching Technique (stripe-FRAP, sFRAP) utilizing a stripe-shaped heterogeneity recorded with a focused beam of the confocal scanning microscope, which allows studying multiple diffusion processes, are presented. The changes in the diffusion coefficient of the initial and transformed particle forms measured using sFRAP and holographic relaxometry techniques are compared.

Разрабатываемый и используемый в работе метод sFRAP основан на создании интенсивным лазерным излучением в исследуемом объекте пространственной неоднородности люминесценции в виде узкой полосы, которая с течением времени расширяется и впоследствии исчезает в результате в результате диффузионного выравнивания концентрации люминесцирующих частиц во всей исследуемой области [1]. Чаще всего в экспериментах sFRAP наблюдается фотообесцвечивание люминофора в прямоугольной области, подвергаемой засветке, но в некоторых экспериментах, например с квантовыми нанокристаллами, интенсивность

люминесценции повышается (фотоактивация). Чаще всего профиль люминесценции экспонированной полоски в результате диффузии приобретает гауссову форму, и по зависимости его ширины от времени можно рассчитать значение коэффициента диффузии и определить размер частиц или микровязкость окружения.

Но при исследовании люминесцирующих углеродных наночастиц средствами лазерной сканирующей микроскопии было обнаружено, что пространственное перераспределение люминесценции (рис. 1) и соответствующая форма профиля интенсивности люминесценции приобретает с течением времени более сложную форму, которая аппроксимируется комбинацией двух гауссовых функций (рис. 2). В такой ситуации помимо локального изменения квантового выхода наночастиц наблюдается фотоиндуцированное изменение их коэффициента диффузии.

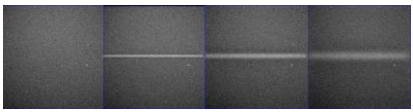


Рис. 1. Эволюция засвеченной полосы в люминесцирующем растворе углеродных точек в карбоксиэтилакрилате

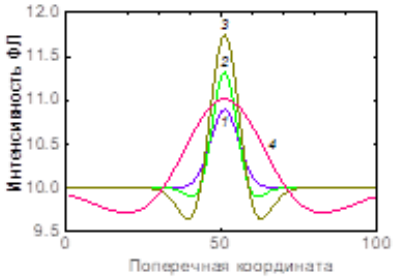


Рис. 2. Аппроксимация пространственных профилей интенсивности люминесценции

Наблюдаемая ситуация соответствовала случаю увеличения квантового выхода и уменьшению коэффициента диффузии наночастиц, что может быть связано с локальной фотополимеризацией наночастиц в исследуемой области [2]. Значения коэффициентов диффузии составили $6{,}9 \pm 0{,}2$ и $0{,}31 \pm 0{,}01$ мкм^2/с для исходной и фототрансформированной форм наночастиц.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, госзадание № 2019-1080, и гранта НИРМА ФТ МФ Университета ИТМО.

Список литературы

1. Hauser G.I., Seiffert S., Oppermann W. // Journal of microscopy. 2008. V. 230 (3). P. 353-362.
2. Das P., et al. // ACS Applied Materials & Interfaces. 2021. V. 13 (26). P. 31038-31050.

УДК 535(06)+004(06)

К.А. ЦЕЛОГОРОДЦЕВ[1,2], С.П. КОТОВА[1,2], Н.Н. ЛОСЕВСКИЙ[2], В.К. УРЮПИНА[1,2]

[1]Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева
[2]Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

ВИХРЕВЫЕ СВЕТОВЫЕ ПОЛЯ ДЛЯ ОПТИЧЕСКОЙ МАНИПУЛЯЦИИ АНСАМБЛЯМИ МИКРООБЪЕКТОВ

В работе представлен эффективный и быстрый метод создания вихревых световых полей с использованием линейной комбинации гауссовых пучков для различных оптических задач. С использованием программного пакета Wolfram Mathematica создана программа по расчёту спиральных пучков. Сформированные поля были протестированы в экспериментах по оптическому захвату и повороту ансамблей микрочастиц.

K.A. TSELOGORODTSEV[1,2], S.P. KOTOVA[1,2], N.N. LOSEVSKY[2], V.K. URYUPINA[1,2]

[1]Samara National Research University
[2]Samara Branch of Lebedev Physical Institute of the RAS

VORTEX LIGHT FIELDS FOR OPTICAL MANIPULATION OF MICRO-OBJECTS ENSEMBLES

The paper presents an efficient and fast method for creating vortex light fields using a linear combination of Gaussian beams for various optical tasks. Using the Wolfram Mathematica software package, a program for calculating spiral beams has been created. The generated fields were tested in experiments on optical capture and rotation of ensembles of microparticles.

При решении задач в области прикладной оптики часто требуется создание вихревых световых полей с определёнными свойствами. Особенно важны поля, обладающие свойствами вращения. Они отлично подходят для поворота ансамблей микрочастиц в задачах оптической манипуляции.

Целью работы является создание быстрого и простого метода формирования вихревых световых полей на основе линейной комбинации гауссовых пучков для манипуляции ансамблями микрочастиц.

Благодаря свойствам спиральных пучков их удобно применять для достижения данной цели. Спиральные пучки – параксиальные пучки

света, которые сохраняют свою структуру при распространении с точностью до масштаба и поворота [1]. Им свойственен значительный ненулевой угловой момент. Когда спиральный пучок представлен в виде линейной комбинации спиральных пучков, он также проявляет свойства спиральности. Основываясь на этом свойстве, была создана программа для расчёта спиральных пучков в рамках Wolfram Mathematica, которая использует линейные комбинации гауссовых пучков.

Рассчитанные вихревые поля были сформированы и проверены в схеме оптического пинцета. Схема установки подробно описана в работе [2]. Основными элементами установки являлись: DPSS лазер переменной мощности на длине волны 532 нм, жидкокристаллический пространственный модулятор света HOLOEYE PLUTO-2-NIR-011 и микроскоп. С помощью ЖК ПМС синтезированные вихревые поля формировались в рабочей зоне оптического пинцета. Световым полем в виде вершин треугольника проведены эксперименты по оптическому захвату, перемещению и повороту микросфер латекса размером 4 мкм (рис. 1). Из рис. 1 видно, что ансамбль латексных микросфер поворачивается на 10 градусов под воздействием светового поля.

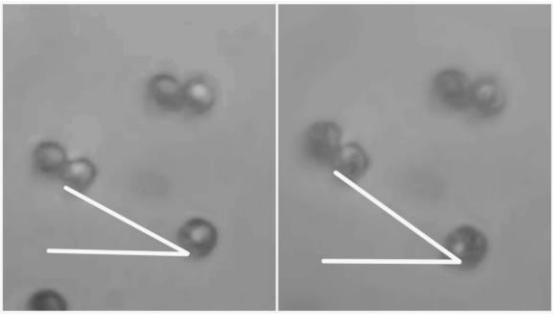


Рис. 1. Оптический захват и поворот ансамбля микрообъектов

Таким образом, нами успешно реализован метод создания вихревых световых полей с использованием линейной комбинации гауссовых пучков и проверен в экспериментах по манипуляции микрочастицами.

Список литературы

1. Abramochkin E.G., Volostnikov V.G. // Opt Commun. 1996.V. 125. P. 302.

2. Котова С.П., Лосевский Н.Н., Майорова А.М., Разуева Е.В., Самагин С.А. // Известия РАН. Серия физическая. 2022. Т. 86. № 12. С. 1685-1689.

УДК 535(06)+004(06)

А.С. БУРКОВ[1,2], Н.В. ТЕРЕЩЕНКО[2], И.А. ЛАРИОНОВ[2],
И.В. ОБРОНОВ[2], Д.В. МЯСНИКОВ[2]
[1]Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный
[2]НТО «ИРЭ Полюс», Фрязино

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ЛИНЗ В ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С МОЩНЫМ ОПТИЧЕСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ГЕРШБЕРГА–СЭКСТОНА

Представлена методика измерения оптической силы тепловых линз с использованием алгоритма Гершберга–Сэкстона, а также их аберраций. Предложенная методика минимизирует вклад тепловых эффектов в элементах измерительной части оптической системы, не относящихся к изучаемому элементу, а также посторонних шумов. Было показано, что метод хорошо себя показывает при проведении измерений в оптически-прозрачных, а также сильно рассеивающих сред. Измерения зависимостей оптической силы термолинзы были проведены для кристалла TGG и керамики Tb_2O_3, при этом результаты измерений в согласии с современными научными работами.

A.S. BURKOV[1,2], N.V. TERESCHENKO[2], I.A. LARIONOV,
I.V OBRONOV[2], D.V. MYASNIKOV[2]
[1]Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny
[2]NTO «IRE-Polus», Fryazino

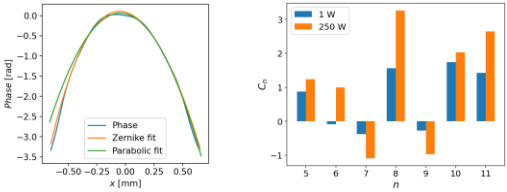
THERMAL LENS MEASUREMENT IN HIGH-POWER OPTICAL SYSTEMS USING THE GERCHBERG–SAXTON ALGORHITM

A technique for thermal lens measurement using the Gerchberg-Saxton algorithm is presented. The proposed technique minimizes the contribution of thermal effects in the intermediate elements of the optical system such as filters, lenses and prisms, and greatly decreases noise impact on the measurements. It was shown that the method performs well when carrying out measurements in optically transparent and highly scattering media. The dependences of the optical power of the thermal lens were measured for the TGG crystal and Tb_2O_3 ceramics, and the results were in agreement with modern scientific works.

При достижении высоких интенсивностей излучения становится заметным разогрев даже материалов с малым коэффициентом оптического поглощения [1]. Появление градиента температуры при таком разогреве из-за воздействия лазерного излучения может приводить к ряду

различных тепловых эффектов. Одним из ключевых таких эффектов является формирование тепловых линз в следствие термооптического эффекта. Тепловые линзы искажают пучок и ухудшают качество пучка за счёт внесения аберраций [2, 3].

В данной работе мы показали возможность измерения параметров тепловых линз с помощью алгоритма Гершберга–Сэкстона [4]. Нами были предложены методы улучшения результата путём внедрения в алгоритм шумоподавления и критерия сходимости. Для определения фазового вклада, рассчитывалась фаза излучения, прошедшего через элемент, и фаза излучения без элемента, после чего рассматривалась разность этих фаз. Такой подход позволяет минимизировать вклад аберраций, не относящихся к изучаемому элементу. При этом, проведя измерения при малой и высокой мощности и рассмотрев разность фазовых вкладов, можно получить фазовый вклад термолинзы, возникающей в элементе. Таким образом, возможно не только определить оптическую силу тепловой линзы, но и особенности её профиля, а также аберрации. Анализ аберраций проводится с помощью полиномов Цернике [5]. Измерения проводились при мощностях от 1 до 250 Вт. Результаты измерений при малой и высокой мощности для кристалла TGG, а также аппроксимация фазового профиля тепловой линзы с помощью параболической зависимости и многочленов Цернике, приведены на рис. 1.



а *б*

Рис. 1. Фазовый профиль тепловой линзы вдоль выбранной оси и аппроксимация (*а*), коэффициенты Cn разложения по полиномам Цернике (*б*)

Список литературы

1. Jamieson T.H. Thermal effects in optical systems // Optical Engineering. 1981. V. 20(2). P. 156-160,

2. Jalali A.A., Rybarsyk J., Rogers E. Thermal lensing analysis of TGG and its effect on beam quality // Optics Express. 2013. V. 21 (11). P. 13741-13747.

3. Chénais S., Druon F., Forget S., et al. On thermal effects in solid-state lasers: The case of ytterbium-doped materials // Progress in Quantum Electronics. 2006. V. 30 (4). P. 89-153.

4. Hansen A.K. Coherent laser phase retrieval in the presence of measurement imperfections and incoherent light // Applied Optics. 2017. V. 56 (26). P. 7341-7345.

5. Alda J., Alonso J., Bernabeu E. Characterization of aberrated laser beams // JOSA A. 1997. V. 14 (10). P. 2737-2747.

УДК 535(06)+004(06)

С.В. САЗОНОВ[1,2,3]
[1]Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва
[2]Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)
[3]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

О ГЕНЕРАЦИИ ШИРОКОПОЛОСНОГО ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МЕТОДОМ ОПТИЧЕСКОГО ВЫПРЯМЛЕНИЯ

Дан краткий анализ механизма генерации широкополосного терагерцового излучения на основе эффекта оптического выпрямления в одноосных кристаллах, обладающих квадратичной оптической нелинейностью.

S.V. SAZONOV[1,2,3]
[1]National Research Centre «Kurchatov Institute», Moscow
[2]Moscow Aviation Institute (National Research University)
[3]Lomonosov Moscow State University

ON THE GENERATION OF BROADBAND TERAHERTZ RADIATION BY THE OPTICAL RECTIFICATION METHOD

A brief analysis of the mechanism of generation of broadband terahertz radiation based on the effect of optical rectification in uniaxial crystals with quadratic optical nonlinearity is given.

Терагерцовое излучение в шкале электромагнитных волн занимает промежуточное положение между микроволновым и инфракрасным диапазонами. Характерные частоты терагерцового излучения охватывают интервал от 0,1 до 10 ТГц. Этому интервалу соответствуют длины волн от 0,01 до 1 мм. В данном диапазоне лежат колебательные, вращательные, колебательно-вращательные и туннельные квантовые переходы. Всеми такими переходами обладают, например, многоатомные органические молекулы. Поэтому терагерцовое излучение уже сегодня находит приложения в системах безопасности (обнаружение наркотиков, взрывчатки и другие), восстановления изображений (в дополнение к рентгену), медицине.

В настоящее время наиболее эффективными представляются методы, основанные на эффекте оптического выпрямления лазерного излучения в кристаллах, обладающих квадратичной нелинейностью поляризационного отклика. Оптическое выпрямление соответствует генерации нулевой

частоты или разности близких друг к другу частот из спектра фемтосекундного (длительностью в несколько десятков фемтосекунд) лазерного импульса. Так как частоты внутри спектра импульса образуют континуальное множество, то возможна генерация всех разностных частот из этого множества. Поэтому в спектральном смысле генерируемый терагерцовый сигнал является широкополосным [1]. Он содержит порядка одного периода электромагнитных колебаний.

Генерация разностной частоты на может быть представлена как распад входного фотона на терагерцовый фотон и другой оптический фотон. В результате несущая частота оптического импульса смещается в красную область [2], что и было обнаружено в эксперименте [3]

Для генерации широкополосного терагерцового сигнала необходимо, чтобы групповая скорость оптического импульса превышала фазовую скорость в терагерцовом диапазоне частот. Это соответствует хорошо известному черенковскому условию [1, 4, 5]. Как правило, данному условию легко удовлетворить в широком диапазоне оптических и терагерцовых частот для различных нелинейных кристаллов. Генерируемый сигнал отрывается от порождающего его оптического импульса, распространяясь по отношению к нему под черенковским углом и теряя регулярную подпитку. Как результат, эффективность генерации весьма невелика: едва достигает значений порядка $\sim 10^{-6}$ по энергии.

Для повышения эффективности генерации используются лазерные импульсы с наклонными волновыми фронтами [3, 6]. Здесь роль черенковского угла играет угол между фазовой и групповой скоростями фемтосекундного оптического импульса. С этой методики на сегодняшний день достигнута эффективность генерации по энергии порядка нескольких процентов [7]. Это обстоятельство выгодно отличает механизм оптического выпрямления от других механизмов генерации широкополосного терагерцового излучения.

Список литературы

1. Абдуллин У.А., Ляхов Г.А., Руденко О.В., Чиркин А.С.// ЖЭТФ. 1974. Т. 66 (4). С. 1295.

2. Бугай А.Н., Сазонов С.В. // Письма в ЖЭТФ. 2008. Т. 87 (8). С. 470.

3. Степанов А.Г., Мельников А.А., Компанец В.О., Чекалин С.В. // Письма в ЖЭТФ. 2007. Т. 85 (5). С. 279.

4. Багдасарян Д.А., Макарян А.О., Погосян П.С. // Письма в ЖЭТФ. 1983. Т. 37 (10). С. 498.

5. Auston D.H., Cheung K.P., Valdmanis J.A., Kleinman D.A. // Phys. Rev. Lett. 1984. V. 53. P. 1555.

6. Hebling J., Almasi G., Kozma I.Z., Kuhl J. // Optics Express. 2002. V. 10. P. 1161.

7. Бугай А.Н. // Физика элементарных частиц и атомного ядра // 2019. Т. 50 (2). С. 185.

УДК 535(06)+004(06)

Д.С. ПОНОМАРЕВ[1], Д.В. ЛАВРУХИН[1,2], А.Э. ЯЧМЕНЕВ[1],
И.Е. СПЕКТОР[2], К.И. ЗАЙЦЕВ[2]

[1]Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова РАН, Москва
[2]Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

ЭФФЕКТИВНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ИМПУЛЬСОВ В ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ НА ОСНОВЕ НОВЫХ ПОДХОДОВ

Системы широкополосной спектроскопии на основе фотопроводящих антенн (ФПА) – излучателей с регистрацией волновой формы терагерцовых импульсов всё более активно применяются для широкого спектра практических приложений. Несмотря на достигнутые успехи в развитии технологии ФПА, основным сдерживающим фактором до сих пор остается довольно низкая эффективность преобразования в таких излучателях. Рассмотрены оригинальные подходы по локализации носителей заряда вблизи электродов ФПА, что позволило увеличить мощность генерации излучения до ~ 10^4 по сравнению с коммерческой ФПА.

D.S. PONOMAREV[1], D.V. LAVRUKHIN[1,2], A.E. YACHMENEV[1],
I.E. SPEKTOR[2], K.I. ZAYTSEV[2]

[1]Institute of Ultra-High Frequency Semiconductor Electronics of the RAS, Moscow
[2]Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow

EXTREMELY EFFICIENT TERAHERTZ EMISSION THROUGH PHOTOCONDUCTION VIA SEMINAL APPROACHES

The increased necessity in photoconductive antenna (PCA) – based terahertz (THz) spectroscopy and imaging requires additional solutions aimed at the enhancement of the THz PCA-emitter. Though enormous attempts have been successfully realized and outstanding results were demonstrated, the ever-growing THz applications stimulate new approaches, and the optimization of the existing as well. We focused our view on optical light confinement, as the tight photocarrier localization increases the efficiency of the emitter. Two different approaches are numerically predicted and experimentally verified. We gained a 10^4-fold THz power boost in plasmonic PCA-emitter over commercial one.

Широкополосная спектроскопия с регистрацией формы терагерцовых (ТГц) импульсов активно развивается с середины 80-х годов XX века, и в настоящее время применяется для решения широкого спектра фундаментальных и прикладных задач [1 - 3]. Благодаря своей

компактности, возможности получения высокого отношения сигнал/шум, а также широкой полосы генерации, для регистрации электромагнитных импульсов ТГц-диапазона частот в современных спектрометрах активно применяются фотопроводящие антенны (ФПА). Несмотря на значительные успехи в развитии технологии ФПА [4, 5], основная проблема таких излучателей заключается в относительно низкой эффективности преобразования энергии импульса лазерной накачки в ТГц-излучение.

В работе рассмотрены два оригинальных подхода, связанных с локализацией носителей заряда вблизи электродов ФПА, что позволяет фотовозбуждённым носителям вносить вклад в генерацию импульса переходного тока до их рекомбинации в фотопроводнике.

Первый подход основан на использовании ранее предложенных нами высоко-аспектных плазмонных электродов [6], что впоследствии позволило увеличить мощность генерации ТГц-импульсов до $\sim 10^4$ по сравнению с коммерческой ФПА [7]. Второй подход заключается в использовании специальной цилиндрической оптической линзы на основе волокон из профилированного сапфира [8, 9], что при определенном соотношении между диаметром волокна и размером зазора ФПА, позволяет значительно увеличить плотность локализации носителей заряда и повысить мощность генерации ТГц-излучения [10].

Список литературы

1. Koch M., et al. // Nat. Rev. Methods Primers. 2023. V. 3. P. 48.
2. Jepsen P., Cooke D., Koch M. // Las. Photon. Rev. 2011. V. 5. P. 124.
3. Lavrukhin D.V., et al. // IEEE Trans. THz. Sci. Technol. 2021. V. 11(4). P. 417.
4. Пономарев Д.С. и др. // УФН. 2024. Т. 194 (1). С. 1.
5. Yachmenev A.E., et al. // Prog. Cryst. Growt. Characteriz. Mat. 2020. V. 66 (2). P. 100485.
6. Lavrukhin D.V., et al. // AIP Adv. 2019. V. 9. P. 015112.
7. Ponomarev D.S., et al. // Opt. Lett. 2023. V. 48 (5). P. 1220.
8. Ponomarev D.S., et al. // Opt. Lett. 2022. V. 47 (7). P. 1899.
9. Пономарев Д.С. и др. // ПЖТФ. 2022. Т. 48 (23). С. 11.
10. Ponomarev D.S., et al. // Proc. of TeraTech. Aizu, Japan, 2023.

УДК 535(06)+004(06)

Д.А. ЗИМНЯКОВ[1,2], С.С. ВОЛЧКОВ[1]
[1]*Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.*
[2]*Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов*

УСИЛЕНИЕ СПОНТАННОЙ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ В СЛУЧАЙНО-НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ: КОНКУРИРУЮЩЕЕ ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ КВАНТОВ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ В НАКАЧИВАЕМОЙ СРЕДЕ И РАДИАЦИОННЫХ ПОТЕРЬ

Экспериментальные данные о спектральных характеристиках флуоресценции насыщенных лазерными красителями случайно-неоднородных сред при различных интенсивностях лазерной накачки интерпретированы в рамках модели, представляющей спектрально-зависимую плотность вероятности эмиссии квантов флуоресценции как функцию среднего времени их жизни в накачиваемой среде.

D.A. ZIMNYAKOV[1,2], S.S. VOLCHKOV[1]
[1]*Yury Gagarin State Technical University of Saratov*
[2]*Precision Mechanics and Control Institute of the RAS, Saratov*

AMPLIFICATION OF SPONTANEOUS FLUORESCENCE IN RANDOM MEDIA: COMPETTION BETWEEN THE DWELL TIME OF FLUORESCENCE PHOTONS IN THE PUMPED MEDIUM AND RADIATION LOSSES

Experimental data on the spectral properties of the fluorescent response of laser-dye-doped random media at various intensities of laser pumping are interpreted in terms of a model representing the wavelength-dependent probability density of fluorescence quanta emission as a function of their average dwell time in the pumped medium.

Эффект сужения спектров флуоресценции случайно-неоднородных сред при высоких интенсивностях лазерной накачки, предсказанный В.С. Летоховым [1], интерпретируется как переход от режима спонтанной флуоресценции к стохастической лазерной генерации. Сужение обусловлено возрастающим вкладом индуцированной составляющей во флуоресцентный отклик. Анализ зависимости отклика от интенсивности накачки позволяет выявлять особенности взаимодействия между центрами флуоресценции и рассеивающей средой. Установлено [2], что при спекл-модуляции лазерного света в среде из-за его когерентности предельная населенность возбуждённого состояния центров определяется

отношением их сечения индуцированного излучения и сечения радиационных потерь локальных эмиттеров флуоресценции.

В работе рассмотрена модель спектрально-зависимой плотности вероятности эмиссии квантов флуоресценции как функции среднего времени их жизни в среде. В модели введён фактор усиления индуцированной составляющей Γ, чувствительный к структурным характеристикам рассеивающей среды. Модель верифицирована с использованием спектров флуоресценции различных случайно-неоднородных сред, насыщенных растворами родамина 6ж и DCM. Спектры регистрировались при накачке исследуемых систем импульсно-периодическим лазерным излучением с длиной волны 532 нм и различными значениями интенсивности.

На рис. 1 представлены спектральные контуры Γ, восстановленные с использованием модели для насыщенных родамином 6ж слоёв наночастиц TiO_2 со средними размерами 25 нм (1) и 100 нм (2). Также приведены нормированные спектры спонтанной флуоресценции (3, 4). Меньшее максимальное значение Γ и его длинноволновый сдвиг по сравнению с (2) свидетельствует о существенном влиянии безызлучательной релаксации возбуждённых состояний на процесс эмиссии в системах с развитой эффективной поверхностью твёрдой фазы. На рис. 2 представлены модельные зависимости полуширины спектров эмиссии от среднего числа актов индуцированного излучения, пропорционального времени жизни флуоресцентных квантов в накачиваемой среде.

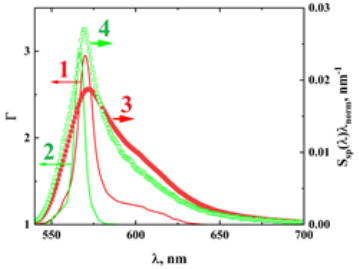


Рис. 1. Факторы усиления Γ и нормированные спектры спонтанной эмиссии для систем с родамином 6ж

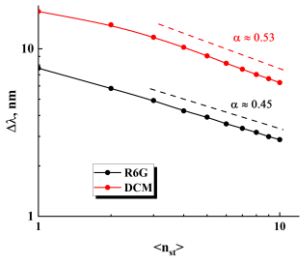


Рис. 2. Зависимости полуширины спектров флуоресценции от среднего числа актов индуцированной эмиссии

Список литературы

1. Letokhov V.S. // Soviet Physics JETP. 1968. V. 26. P. 835.
2. Zimnyakov D.A., et. al. // Nanomaterials. 2022. V. 12(14). Art. 2450.

УДК 535(06)+004(06)

А.В. ВЕНИАМИНОВ, Л.Н. БОРОДИНА
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ, ДИФФУЗИЯ И ГОЛОГРАФИЯ: ЛАЗЕРНАЯ СКАНИРУЮЩАЯ МИКРОСКОПИЯ И ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ РЕЛАКСОМЕТРИЯ ДВИЖЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ И МОЛЕКУЛ

Продемонстрировано, что не только в голографических, но и в люминесцентных исследованиях, основанных на наблюдении релаксации фотоиндуцированной оптической неоднородности, проявляется изменение коэффициента диффузии в результате экспонирования. Приведено описание трансформации голографической решётки и люминесцирующей полосы, записанной при воздействии сфокусированного света лазерного сканирующего микроскопа и последующей диффузионной релаксации, отслеживаемых соответственно по дифракционному и люминесцентному отклику. Выполнено сравнительное исследование диффузии в модельной системе двумя методами.

A.V. VENIAMINOV, L.N. BORODINA
ITMO University, Saint-Petersburg

LUMINESCENCE, DIFFUSION AND HOLOGRAPHY: LASER SCANNING MICROSCOPY AND HOLOGRAPHIC RELAXOMETRY OF NANOPARTICLES' AND MOLECULES' MOTION

We show that a change in the diffusion coefficient as a result of exposure manifests itself not only in holographic, but also in luminescent studies based on the relaxation of photoinduced optical inhomogeneity. The diffusive transformations of a grating recorded by holographic means and a luminescent stripe produced by a focused light of a laser scanning microscope and subsequent diffusion relaxation, tracked respectively by diffractive and luminescent responses, are described. A comparative study on diffusion in a model system is fulfilled using two techniques.

В работе проведено сравнение результатов исследования непрерывного изменения коэффициента диффузии камфорхинона (КХ) и продукта его фототрансформации в диметиловом эфире фенолфталеина методом восстановления люминесценции sFRAP и методом голографической релаксометрии, основанными на создании в образце пространственной неоднородности и наблюдении её изменения в результате диффузии.

Измерения проводились при температурах 50 - 70 °C в вязком расплаве PDE. На рис. 1 и 2 представлены промежуточные результаты измерений двумя методами, отражающие вызванную диффузией релаксацию фотоиндуцированных структур: зависимости интенсивности света, дифрагирующего на фотоиндуцированных решётках с пространственными периодами, различающимися в пределах почти двух порядков, от времени и пространственные профили интенсивности фотолюминесценции, зарегистрированные через различные промежутки времени после экспонирования участка образца, вызвавшего изменение его диффузионных и люминесцентных характеристик.

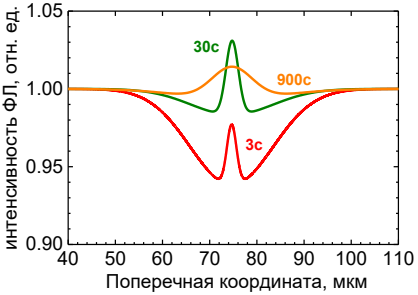


Рис. 1. Пространственные профили фотолюминесценции КХ и продукта его фотовосстановления, зарегистрированные через 3, 30 и 900 С после экспонирования узкой полосы образца

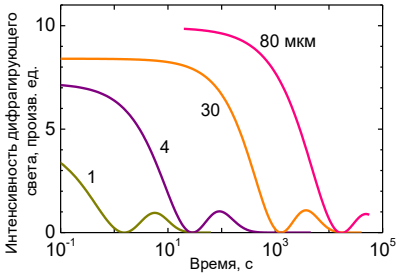


Рис. 2. Кривые релаксации фотоиндуцированных решёток с пространственными периодами 1 - 80 мкм, записанных с использованием фотовосстановления КХ

Значения коэффициентов диффузии, полученные двумя разными методами – по данным о скоростях релаксации решёток и ширины профиля люминесценции, совпадают в пределах погрешностей. При этом коэффициент диффузии КХ на порядок превосходит коэффициент диффузии фотопродукта (0.02 ± 0.01 против 0.002 ± 0.001 мкм^2/с при 50 °C), несмотря на, казалось бы, небольшое увеличение молекулярного объёма при фотовосстановлении.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, госзадание № 2019-1080, и гранта НИРМА ФТ МФ Университета ИТМО.

С.М. ПОПОВ, О.В. БУТОВ[1], А.А. РЫБАЛТОВСКИЙ[2],
Д.В. РЯХОВСКИЙ, Д.С. ЛИПАТОВ[3], А.А. ФОТИАДИ[4],
Ю.К. ЧАМОРОВСКИЙ

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
[1]Институт радиотехники и электроники РАН им. В.А. Котельникова, Москва
[2]Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва
[3]Институт химии высокочистых веществ РАН, Нижний Новгород
[4]Ульяновский государственный университет

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ ОДНОЧАСТОТНЫЙ СЛУЧАЙНЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕР, РАБОТАЮЩИЙ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

В работе представлены последние результаты по созданию «случайных» волоконных лазеров с резонатором на основе эрбиевого оптического волокна (ОВ) с массивом волоконных брэгговских решёток записанных в процессе вытяжки ОВ. Полученная лазерная генерация на длине волны 1548 нм при накачке на длине волны 976 нм имеет эффективность 33 %. с шириной линии около 550 Гц.

S.M. POPOV, O.V. BUTOV[1], A.A. RYBALTOVSKII[2],
D.V. RYAKHOVSKII[1], D.S. LIPATOV[3], A.A. FOTIADI[4],
Yu.K. CHAMOROVSKIY

Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS
[1]Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS, Moscow
[2]Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow
[3]Institute of Chemistry of High-Purity Substances of the RAS, Nizhny Novgorod
[4]Ulyanovsk State University

HIGHLY EFFICIENT SINGLE FREQUENCY FIBER RANDOM LASER OPERATING IN THE TELECOMMUNICATIONS WAVELENGTH RANGE

The paper presents the latest results on the creation of «random» fiber lasers with cavity based on erbium doped optical fiber (OF) with an array of fiber Bragg gratings inscribed during the OF's drawing process. Lasing with a maximum efficiency of 33 % and linewidth of about 550 Hz obtained at λ = 1548 nm with pumping at λ = 976 nm.

Новым направлением исследований в области фотоники являются «случайные» волоконные лазеры, где обратная связь достигается за счёт

рассеяния Рэлея, а усиление за счёт эффектов рассеяния Рамана [1] или ВРМБ [2]. Ранее нами была получена одночастотная лазерная генерация на λ = 1547,6 нм в оптическом волокне (ОВ), легированным ионами эрбия с резонатором из массива волоконных брэгговских решёток (ВБР), состоящим из 500 отражателей (общая длина резонатора 5 м) с эффективностью около 2,5 % и шириной линии около 300 Гц [3]. Запись массива выполнялась во время процесса вытяжки ОВ с помощью эксимерного УФ-лазера работающего на λ = 248 нм. Период фазовой маски – 1070 нм. В работе [4] реализована «полуоткрытая» конфигурация резонатора «случайного» лазера в ОВ, легированном ионами эрбия и 90 % ВБР, согласовано отражающих на λ = 1548 нм и накачке на λ = 976 нм или λ = 1485 нм. Диаметр сердцевины/оболочки ОВ – 5/125 мкм, длина волны отсечки 900 нм, длина резонатора 6 м (600 ВБР) – показано на рис. 1. Эффективность лазерной генерации при длине волны накачки 976 (1485) нм составляет 33 (29) %. Максимальная выходная мощность достигает величины 80 мВт на длине волны 1548 нм. Ширина спектра измеренный методом автогетеродинирования – около 550 Гц (рис. 2).

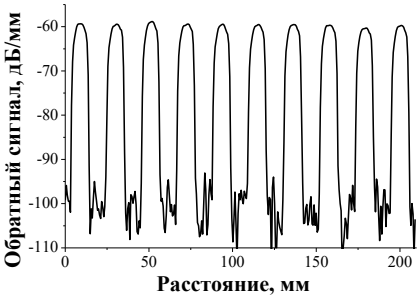


Рис. 1. Структура резонатора лазера, измерено на длине волны 1548 нм

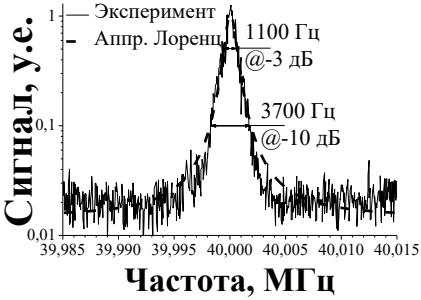


Рис. 2. Радиочастотный спектр лазерного излучения при накачке 72 мВт, λ = 976 нм

Данный источник излучения интересен для применения для систем связи и сенсорных систем (когерентная рефлектометрия).

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А Котельникова РАН. Работа А.А. Рыбалтовского и Д.С. Липатова поддержана проектом РНФ № 22-19-00511. Работа А.А. Фотиади поддержана проектом РНФ № 23-79-30017.

Список литературы

1. Turitsyn S.K., Babin S.A., et al. // Nature Photonics. 2010. V. 9. P. 231.
2. Fotiadi A.A. // Nature Photonics. 2010. V. 4. P. 204.
3. Popov S.M., Butov O.V., et al. // Results in Physics. 2020. V. 16. P. 102868.
4. Popov S.M., Butov O.V., et al. // Photonics. 2023. V. 10. P. 748.

Н.Д. МАГНИЦКИЙ[1,2], П.В. ПУЮ[2], Д.В. МЯСНИКОВ[2]
[1]Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный
[2]НТО «ИРЭ Полюс», Фрязино

ГЕНЕРАЦИЯ МОЩНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЗЕЛЁНОГО ДИАПАЗОНА ОТ ПИКОСЕКУНДНОГО ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА

Приведены результаты экспериментов по генерации мощного излучения на длине волны 515 нм (зелёный свет) на основе пикосекундного волоконного иттербиевого лазера.

N.D. MAGNITSKIY[1,2], P.V. PUYU[2], D.V. MYASNIKOV[2]
[1]Moscow Institute of Physics and Technology(National Research University), Dolgoprudny
[2]NTO «IRE-Polus», Fryazino

GENERATION OF POWERFUL GREEN RANGE RADIATION FROM A PICOSECOND FIBER LASER

Results of experiments on the generation of high-power green radiation at a wavelength of 515 nm from a picosecond ytterbium fiber laser are presented.

Прямая генерация лазерного излучения возможна только в узких спектральных диапазонах. Поэтому для получения новых длин волн лазерного излучения используют методы нелинейной оптики. К ним относятся генерация гармоник и параметрическое преобразование лазерного излучения в нелинейно-оптических кристаллах.

Пикосекундные лазерные источники имеют множество различных областей применения. Так, например, они используются для прецизионной обработки стекла, керамики, металлов и прочих материалов [1], а также в лазерной медицине [2].

Целью данной работы являлось получение генерации пикосекундного лазерного излучения на длине волны 515 нм с помощью источника с пиковой мощностью Мегаваттного диапазона.

В качестве источника излучения был взят иттербиевый пикосекундный волоконный лазер, его основные параметры указаны в табл. 1.

Излучение на требуемой длине волны получалось как результат процесса генерации второй гармоники в нелинейно-оптическом кристалле трибората лития [3, 4]. Кристалл обладал следующими параметрами:

длина 5 мм, температура синхронизма 50 °C, углы выреза $\theta = 90$ °, $\varphi = 12.8$ °. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Излучение накачки фокусировалось с помощью линзы так, что диаметр перетяжки внутри кристалла составлял около 700 мкм. Все использованные линзы, а также входная и выходная грани кристалла имели просветление на две длины волны: 1030 и 515 нм.

Ватт-ваттная характеристика преобразования излучения представлена на рис. 2. Максимальная мощность излучения на длине волны 515 нм достигла 44.4 Вт, что соответствует энергии импульса 24 мкДж. Эффективность преобразования в среднем составила 64 %.

Таблица 1. Параметры источника излучения

Длина волны λ, нм	Ширина спектра (FWHM) Δλ, нм	Частота следования импульсов PRR, КГц	Длительность импульса τ, пс	Максимальная мощность	
				пиковая, P_{peak}, МВт	средняя, P_{mean}, Вт
1030	0.4	1850	13	3.04	73

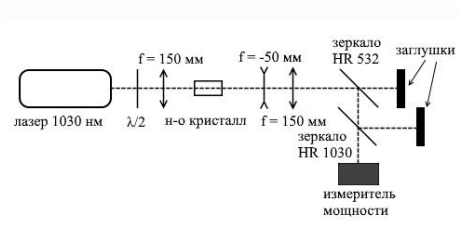


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

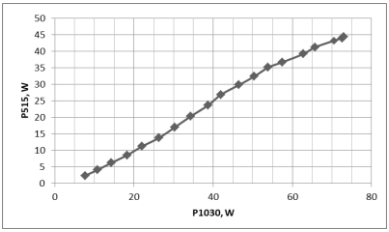


Рис. 2. Ватт-ваттная характеристика генерации второй гармоники

Полученное излучение планируется использовать в дальнейших экспериментах по получению более высоких оптических гармоник (УФ-диапазон).

Список литературы

1. Knappe R. Applications of picosecond lasers and pulse-bursts in precision manufacturing // Proceeding of SPIE. 2012. V. 8243. P. 96-102.

2. Torbeck R.L., Schilling L., et al. Evolution of the picosecond laser: a review of literature // Dermatologic Surgery. 2019. V. 45 (2). P. 183-194.

3. Franken P.A., Hill A.E., Peters C.W., Weinreich G., Generation of optical harmonics // Physical Review Letters. 1961. V. 7 (4). P. 118-119.

4. Дмитриев В.Г., Тарасов Л.В. Прикладная нелинейная оптика. М.: Физматлит, 2004.

А.И. ЛОБАНОВ[1,2], А.А. СИРОТКИН[1], Ю.Л. КАЛАЧЕВ[1],
С.А. ФИЛАТОВА[1], В.А. КАМЫНИН[1], Б.Д. ОВЧАРЕНКО[1],
В.Б. ЦВЕТКОВ[1]

[1]Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва
[2]Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ГИБРИДНАЯ ОПТОВОЛОКОННО-ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЛАЗЕРНАЯ СИСТЕМА УСИЛЕНИЯ МОЩНОСТИ С ПИКОСЕКУНДНЫМ ЗАДАЮЩИМ ГЕНЕРАТОРОМ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 2086 нм

Сознана гибридная оптоволоконно-твердотельная лазерная система с задающим генератором на основе гольмиевого волоконного лазера и усилителем на основе кристалла YSGG:Cr^{3+}:Tm^{3+}:Ho^{3+}. Продемонстрирована временная динамика усиления кристалла YSGG:Cr^{3+}:Tm^{3+}:Ho^{3+}.

A.I. LOBANOV[1,2], A.A. SIROTKIN[1], Yu.L. KALACHEV[1],
S.A. FILATOVA[1], V.A. KAMYNIN[1], B.D. OVCHARENKO[1],
V.B. TSVETKOV[1]

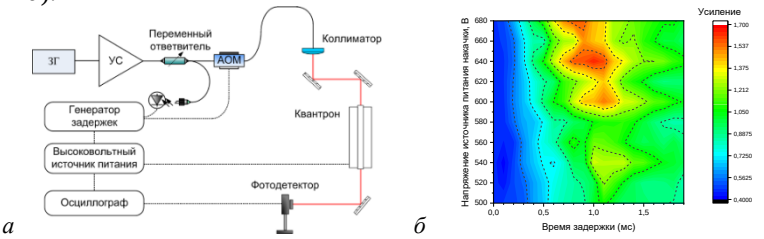
[1]Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow
[2]National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

HYBRID FIBER/SOLID-STATE POWER AMPLIFIER LASER SYSTEM WITH 2086 nm PICOSECOND MASTER OSCILLATOR

A hybrid fiber/solid-state laser system with a master oscillator based on a holmium fiber laser and an amplifier based on a YSGG:Cr^{3+}:Tm^{3+}:Ho^{3+} crystal has been created. The time dynamics of amplification of YSGG:Cr^{3+}:Tm^{3+}:Ho^{3+} crystal was demonstrated.

В последние несколько лет волоконные лазеры приобрели большое значение во многих научных и промышленных применениях, где ранее доминировали другие типы лазерных источников. Однако волоконные системы не лишены недостатков. Одним из недостатков данных систем является сложность достижения высоких энергий выходных импульсов. Основным фактором, вызывающим это ограничение, является нелинейное преобразование оптического излучения в волокне. Использование твердотельных усилителей совместно с волоконными квантовыми генераторами позволяет обойти данную проблему.

В настоящей работе исследована возможность использования кристалла YSGG:Cr^{3+}:Tm^{3+}:Ho^{3+} в качестве твердотельного усилителя для гольмиевого волоконного лазера. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1*а*. В качестве задающего генератора использовался гольмиевый волоконный лазер, работающий в режиме синхронизации мод [1]. Длительность импульсов источника не превышала 2 пс, центральная длина волны генерации была 2086 нм. Связка акустооптического модулятора и генератора задержек, который синхронизирован с работой лазера, прореживает последовательность импульсов от источника таким образом, что частота выходного сигнала становится равной 1 Гц. Далее излучение попадало в квантрон с кристаллом YSGG:Cr^{3+}:Tm^{3+}:Ho^{3+} с размерами 3×90 мм. Накачка квантрона осуществляется лампой, мощность которой контролируется высоковольтным импульсным источником питания (с длительностью импульса 1 мс). Источник питания также управляется генератором задержки, который синхронизирует время поступления оптического импульса в квантрон и время подачи тока на лампу накачки. Данная конфигурация измерительной установки позволит просканировать по времени динамику усиления. В результате было зафиксировано усиление сигналов ультракоротких импульсов в зависимости от времени задержки сигнального импульса относительно импульса накачки для различных значений напряжения импульса накачки (рис. 1*б*).



а *б*

Рис. 1. Схема экспериментальной установки (*а*), карта динамики усиления в зависимости от временной задержки оптического короткого импульса от импульса накачки *(б)*

В данной работе мы представили гибридную оптоволоконно-твердотельную лазерную систему усиления пикосекундных импульсов и изучили её временную характеристику усиления в диапазоне напряжений накачки от 500 до 680 В.

Список литературы

1. Filatova S.A. и др.. Spectral and temporal dynamics of ultrashort pulses in a holmium-doped fibre amplifier // Quantum Electronics. 2019. No. 12 (49). P. 1108-1111.

УДК 535(06)+004(06)

А.Н. ДЕНИСОВ, С.Л. СЕМЁНОВ
Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова ИОФРАН , Москва

ВЛИЯНИЕ ПОЛИМЕРНОГО ПОКРЫТИЯ НА ИЗГИБНЫЕ ПОТЕРИ ПОЛНОСТЬЮ СТЕКЛЯННЫХ МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ

Представлены результаты численных исследований зависимости изгибных потерь полностью стеклянных микроструктурированных волоконных световодов (МВС) от радиуса изгиба и от наличия защитного полимерного покрытия. Рассчитаны потери на вытекание фундаментальных мод на длине волны 1,05 мкм для МВС без полимерного покрытия и с полимерным покрытием при радиусах изгиба 4,5 - 11,0 см.

A.N. DENISOV, S.L. SEMJONOV
Dianov Fiber Optics Research Center of Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow

EFFECT OF POLYMER COATING ON BENDING LOSSES OF ALL-GLASS MICROSTRUCTURED OPTICAL FIBERS

We present the results of numerical studies of the dependence of bending losses of all-glass microstructured optical fibers (MOFs) on the bending radius and on the presence of a protective polymer coating. Leakage losses of fundamental modes at a wavelength of 1.05 μm have been calculated for uncoated and polymer-coated MOFs at bending radii of 4.5 - 11.0 cm.

В настоящее время наблюдается значительный интерес к непрерывным волоконным лазерам мощностью несколько кВт [1]. Одновременно продолжаются исследования в области одномодовых волоконных световодов с большим полем моды, как активных, являющихся основой для мощных волоконных лазеров, так и пассивных, необходимых для передачи мощного лазерного излучения [2]. Важным параметром таких световодов являются их изгибные потери, в частности, для создания достаточно компактных волоконных лазеров необходимо обеспечение низких потерь при малых радиусах изгиба.

Целью работы является численное исследование зависимости изгибных потерь предложенного ранее полностью стеклянного МВС-18 [3, 4] от радиуса изгиба и от наличия защитного полимерного покрытия.

Этот МВС-18 содержит два слоя круглых элементов из легированного фтором кварцевого стекла с пониженным показателем преломления, разными диаметрами и различными расстояниями между собой (рис. 1).

Численные расчёты характеристик МВС-18 проводились с использованием метода конечных элементов. Расчёты потерь на вытекание изогнутого МВС-18 проводились путём его замены прямым МВС-18 с эквивалентным профилем показателя преломления $n_{экв}$, определяемым с помощью выражения:

$$n_{экв}(x, y) = n(x, y)\times(1 + x/R),$$

где $n(x, y)$ – исходный профиль показателя преломления прямого МВС-18, R – радиус изгиба в метрах.

На рис. 2 приведены зависимости потерь на вытекание для МВС-18 без полимерного покрытия и с полимерным покрытием от радиуса изгиба. Как видно из этого рисунка, при радиусе изгиба R = 10 см МВС-18 с полимерным покрытием имеет существенно меньшие потери на вытекание (0,003 дБ/м), чем МВС-18 без полимерного покрытия (0,014 дБ/м).

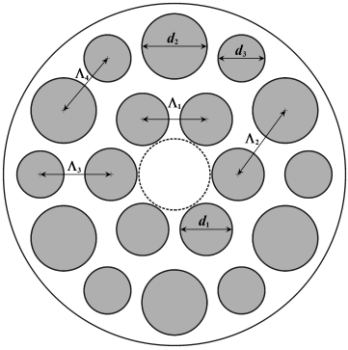


Рис. 1. Структура МВС-18

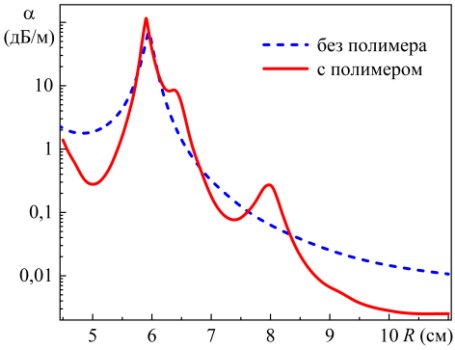


Рис. 2. Изгибные потери МВС-18

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки (грант № 075-15-2022-315 на создание и развитие научного центра мирового уровня «Центр фотоники»).

Список литературы

1. Pulford B., Holten R., et al. // Opt. Lett. 2021. V. 46 (18). P. 4458.
2. Nicholson J.W., DeSantolo A., et al. // Proc. SPIE. 2022. V. 11981 P. 119810R.
3. Denisov A.N., Semjonov S.L. // Quantum Electronics. 2021. V. 51 (12). P. 1081.
4. Denisov A.N,, Dvoyrin V., et al. // Photonics. 2023. V .10 (465).

А.С. ГАСИН, А.М. СМОЖНЫЙ, Д.П. СУДАС[1], К.М. ГОЛАНТ[1]
МИРЭА – Российский технологический университет, Москва
[1]Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ОБРАТНОЙ СВЯЗИ НА ПАРАМЕТРЫ ВЫХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ КОЛЬЦЕВОГО ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА

При помощи созданного кольцевого волоконного эрбиевого лазера с переменной величиной отводимой из резонатора энергии контролировали характеристики выходного излучения. Набором различных оптических разветвителей обеспечивали изменение коэффициента обратной связи в резонаторе от 5 до 95 %. Использованный модулятор добротности на основе полированного сбоку волокна позволил, при помощи изменения плоскости поляризации, изменять положение пика генерации от 1550 до 1560 нм без существенного ущерба для выходных параметров импульсов. Кроме того, при выводе более 80 % излучения из схемы наблюдался режим синхронизации мод. Длительность импульсов составила в этом случае 5 нс с частотой следования равной 4 МГц. В режиме модуляции добротности (до 700 нс при 38 кГц), наблюдалось стабильное положение пика в спектре генерации, а также средняя мощность на уровне 47 мВт.

A.S. GASIN, A.M. SMOZHNY, D.P. SUDAS[1], K.M. GOLANT[1]
MIREA – Russian Technological University, Moscow
[1]Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS

INFLUENCE OF THE FEEDBACK FACTOR ON THE OUTPUT RADIATION PARAMETERS OF A RING FIBER LASER

Using the created ring fiber erbium laser with a variable amount of energy removed from the resonator, the output characteristics of the radiation were controlled. A set of various optical splitters provided a change in the feedback coefficient in the resonator from 5 to 95 %. The used Q-switch based on a side-polished fiber made it possible, by changing the plane of polarization, to change the position of the generation peak from 1550 to 1560 nm without significant damage to the output parameters of the pulses. In addition, when more than 80 % of the radiation is removed from the circuit, mode locking is observed. The pulse duration in this case was 5 ns with a repetition rate of 4 MHz. In Q-switching mode (up to 700 ns at 38 kHz), a stable peak position in the generation spectrum is observed, as well as an average power of 47 mW.

Кольцевые волоконные лазеры позволяют обеспечить широкий диапазон доступных параметров генерации импульсного и непрерывного когерентного излучения благодаря возможности адаптировать схему под различные применения [1]. Меняя длину резонаторной полости, отдельные узлы и активную среду легко добиться, как высокой оптической мощности непрерывного излучения, так и сверхкоротких импульсов [2]. При помощи нелинейных элементов, на основе насыщающихся поглотителей, реализуют режимы пассивной модуляции добротности и синхронизации мод, при этом каждый из них требует своих необходимых характеристик лазерной схемы [3].

На полированное сбоку оптическое волокно (толщиной 66.6 мкм) наносился полимерный композит с наночешуйками Bi_2Te_3 и полученный модулятор добротности вваривался в схему кольцевого эрбиевого лазера. Меняя выходной разветвитель, контролировали выходные параметры генерации лазера. Практически при любом соотношении энергии запасаемой и выводимой наблюдалась импульсная генерация. При этом, по мере увеличения до 70 % наблюдается максимум средней мощности на уровне 47 мВт. Дальнейшее увеличение выводимой мощности приводило к генерации дополнительного пика в более коротковолновой области (рис. 1) и даже достижения режима синхронизации мод (рис. 2).

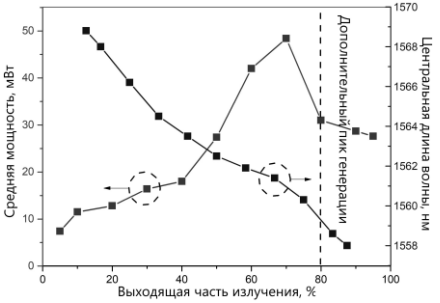


Рис. 1. Спектральные характеристики выходного излучения волоконного лазера

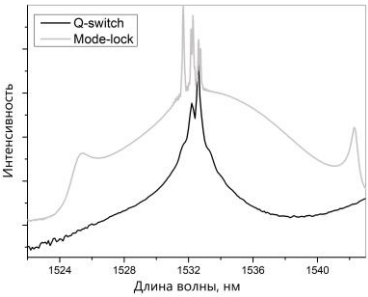


Рис. 2. Спектр лазера при разных режимах генерации

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (№ 075-01110-23-01).

Список литературы

1. Woodward R.I., Kelleher E.J.R. // Appl. Sci. 2015. V. 5. No. 4. P. 1440-1456.
2. Liu X., et al. // Photon. Res. 2017. V. 5. P. 461-466.
3. Gao L., et al. // Applied Optics, 2014. V. 53. No. 23. P. 5117-5122.

А.А. МАКОВЕЦКИЙ, С.М. ПОПОВ, Д.В. РЯХОВСКИЙ,
А.А. ЗАМЯТИН
Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

“РЕЗОНАНСНЫЕ” ТРАЕКТОРИИ КОСЫХ ЛУЧЕЙ В МНОГОМОДОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ

Разработан алгоритм расчёта траекторий косых лучей (гибридных мод) в многомодовом оптическом волокне (ОВ) со ступенчатым профилем показателя преломления. При моделировании траекторий косых лучей, возбуждённых в ОВ при различных условиях ввода излучения в ОВ, выявлены “резонансные” виды траекторий. Проведена качественная экспериментальная проверка разработанного алгоритма.

A.A. MAKOVETSKII, S.M. POPOV, D.V. RYAKHOVSKII,
A.A. ZAMYATIN
Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS

“RESONANCE” TRAJECTORIES OF OBLIQUE RAYS IN MULTIMODE OPTICAL FIBERS

An algorithm has been developed for calculating the trajectories of oblique rays (hybrid modes) in a multimode optical fiber with a stepped refractive index profile. When modeling the trajectories of oblique rays excited in the optical fiber under different conditions for introducing radiation into the optical fiber, “resonant” types of trajectories were identified. A qualitative experimental test of the developed algorithm was carried out.

Рассматриваемые в рамках геометрической оптики косые лучи являются качественными аналогами гибридных мод многомодовых оптических волокон (ОВ) [1, 2]. В работе [3] разработан алгоритм расчёта траекторий таких лучей. Он сводится к раздельному вычислению поперечных (x_i, y_i) и продольных (z_i) координат точек отражения луча от границы раздела сердцевина/оболочка по формулам:

$$x_i = R \cdot \cos(\psi_1),\ y_i = R \cdot \sin(\psi_1), \text{ где } i = 1, 2, 3, \ldots, n$$

$$\beta = Arc\sin(\chi_S / R),\ \psi_1 = \pi/2 - \beta,\ \psi_i = \psi_1 + (i-1) \cdot (\pi - 2 \cdot \beta),$$

$$z_i = (i - 1/2) \cdot \Delta z, \text{ где } \Delta z = 2 \cdot \sqrt{R^2 - \chi_S^2} \cdot \frac{\cos\theta}{\sin\theta};$$

здесь θ – угол падения входного луча на торец ОВ, R – радиус его сердцевины. Заметим, что для возбуждения косых лучей плоскость падения входного луча должна быть параллельна оси волокна и сдвинута относительно её на величину $\chi_S \in (0, R)$, задающую радиус каустики.

При моделировании установлены характерные топологические виды проекций траекторий косых лучей на выходной торец оптического волокна (рис. 1*а* - *г*). Среди них отметим обычные (*а*), типа “двойной веер” (*б*) и “резонансные” проекции (*в*, *г*). Последние возникают при $\chi_S(k, m) = \sin((\pi/2 \cdot (1 - 2 \cdot m/k)) \cdot R$, где k и m – целые числа, причём $m < k/2$.

Установлено топологическое подобие характерных проекций траекторий косых лучей и распределений интенсивности излучения (λ = 532 нм) на выходных торцах кварц-полимерных ОВ с диаметром сердцевины 400 и 600 мкм (рис. 1*д* - *з*).

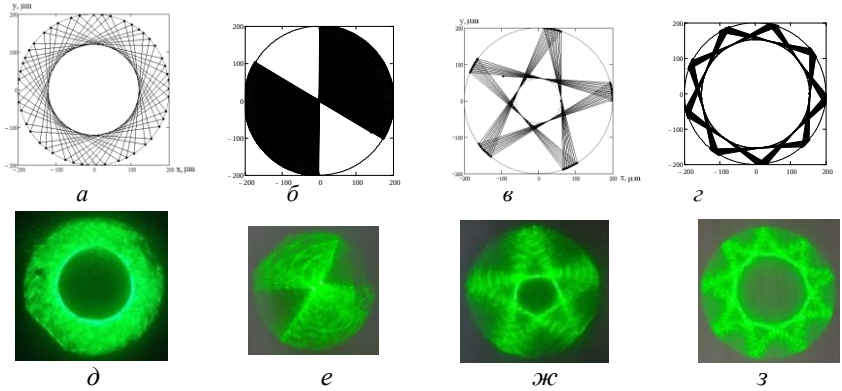


Рис. 1. Расчётные проекции траекторий косых лучей на выходной торец ОВ (*а* - *г*), фото распределений интенсивности излучения λ = 532 нм на выходном торце КП-СИЭЛ 40 мкм при различных условиях ввода излучения (*д* - *з*)

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Список литературы

1. Вейнберг В.Б., Саттаров Д.К. Оптика световодов. Л.: Машиностроение, 1977.
2. Снайдер А., Лав Д. Теория оптических волноводов. М.: Радио и связь, 1987.
3. Маковецкий А.А., Попов С.М., Ряховский Д.В. Квантовая электроника. 2023. Т. 53. № 6. С. 496.

УДК 535(06)+004(06)

В.А. ЯКИМУК, В.А. КОМИСАРОВ, Ю.И. ЯНДЫБАЕВА,
У.Р. КОРОБКОВА, С.В. ВАРЖЕЛЬ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ЗАПИСЬ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЁТОК МЕТОДОМ ФАЗОВОЙ МАСКИ С ТРАНСЛЯЦИЕЙ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА

Приведены результаты экспериментов по формированию волоконных брэгговских решёток (ВБР) методом трансляции лазерного пучка вдоль зафиксированных фазовой маски и оптического волокна. Определены зависимости спектральных характеристик получившихся решёток от параметров перемещения лазерного пучка.

V.A. YAKIMUK, V.A. KOMISAROV , Yu.I. YANDYBAEVA,
U.R. KOROBKOVA, S.V. VARZHEL
ITMO University, Saint-Petersburg

FIBER BRAGG GRATINGS INSCRIPTION BY PHASE MASK METHOD WITH LASER BEAM TRANSLATION

The results of experiments on the fiber Bragg gratings fabrication using the method of laser beam translation along a fixed phase mask and optical fiber are presented. The dependences of the spectral characteristics of the observing gratings on the parameters of the laser beam movement were determined.

Волоконные брэгговские решётки (ВБР) являются ключевыми элементами в областях телекоммуникаций и оптической волоконной сенсорики. Существует несколько способов записи ВБР: с использованием фазовой маски [1], интерферометрические методы [2], пошаговый метод [3]. Наиболее часто используемым методом по-прежнему остается метод с использованием фазовой маски, поскольку он значительно упрощает процесс изготовления и позволяет получать длинные решётки, однако, также представляет интерес запись ВБР с перемещением лазерного излучения для получения их улучшенных характеристик.

Таким образом, целью работы является исследование схемы записи волоконных брэгговских решёток методом фазовой маски с трансляцией пучка и анализ спектральных характеристик полученных ВБР. В схеме, представленной на рис. 1, используются следующие компоненты: эксимерная лазерная KrF-системы «COHERENT COMPexPro 102» с

центральной длиной волны 248 нм, зеркала с интерференционным покрытием на 248 нм, высокоточная линейная подвижка с ходом 30 мм, фазовая маска Ibsen photonics ± 1 порядка дифракции (период 1071.5 нм, размер 70 х 10 мм).

Для записи ВБР ультрафиолетовое излучение ($E_{им}$ = 121 мДж, ν = 2 Гц) с размером пучка 24 х 6 мм перемещалось со скоростью 11 мкм/с на расстояние 30 мм. Фазовая маска и оптическое волокно были зафиксированы на протяжении записи ВБР. В результате получена ВБР длиной 54 мм. Спектр полученной решётки изображён на рис. 2, её параметры: центральная длина волны 1550.394 нм, ширина решётки по уровню -3 dB составляет 0.036 нм, отражение составляет 85 %.

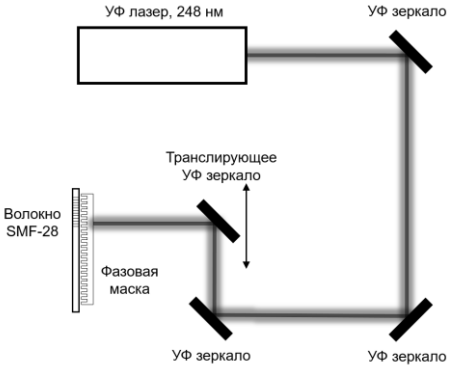


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

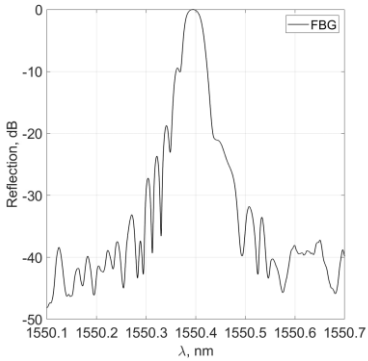


Рис. 2. Спектр волоконной брэгговский решётки

Список литературы

1. Melo M., Marques P.V.S. Fabrication of tailored Bragg gratings by the phase mask dithering/moving technique // Photonic Sensors. 2013. V. 3. P. 81-96.

2. de Groot P.J., et al. Interferometer design for writing Bragg gratings in optical fibers // Proc. SPIE. 2002. V. 4777. P. 31-38.

3. Martin J., Ouellette F. Novel writing technique of long and highly reflective in-fibre gratings // Electronics Letters. 1994. V. 30. No. 10. P. 811-812.

Г.Р. ВОСКАНЯН[1,2,3], А.В. ГРИЦИЕНКО[2,3], Н.С. КУРОЧКИН[2,3]
[1]Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
[2]Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва
[3]Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный

ИНТЕГРАЦИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ МИКРОЧАСТИЦ С ОПТИЧЕСКИМ ВОЛОКНОМ МЕТОДОМ САМОЗАПИСИ

Описан метод интеграции микрочастиц с оптическим волокном с помощью фабрикации самозаписанного волновода, формирующегося из фотоотверждаемой полимерной композиции. В эксперименте наблюдалась интеграция микрочастицы алмаза с одномодовым оптическим волокном.

G.R. VOSKANYAN[1,2,3], A.V. GRITSIENKO[2,3], N.S. KUROCHKIN[2,3]
[1]Bauman Moscow State Technical University
[2]Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow
[3]Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

SELF-WRITING AS A TOOL FOR LUMINESCENT MICRO-PARTICLE TO OPTICAL FIBER COUPLING

This work presents a method for coupling of micro-particles to an optical fiber by laser light induced fabrication of a self-written waveguides (SWW) in a photopolymerizable composite medium. We experimentally observe coupling of a single diamond micro-particle to a single-mode optical fiber.

В настоящее время люминесцентные нано- и микрочастицы широко используются в качестве температурных сенсоров [1]. Доставка излучения таких частиц часто осуществляется с помощью посадки частицы на оптоволоконный тейпер, что является трудоемким процессом [2]. Ранее описывалось явление самоканализации пучка света по мере роста твёрдой фракции в фотоотверждаемой среде для создания самозаписанных волноводов [3, 4]. В данной работе предлагается метод использования эффекта самозаписи для интеграции люминесцентных микрочастиц с оптическим волокном.

Создание микроструктуры осуществляется в несколько этапов на установке, состоящей из блока ввода излучения и системы фиксации волокна (рис. 1). На позиционном этапе производится фиксация волокна в вертикальном положении над образцом с подготовленными микро- или

наночастицами и совмещение проекции сердцевины волокна по центру над частицей. При этом на торце предварительно размещается капля фоторезиста. На этапе фотополимеризации производится отверждение резиста под действием излучения, распространяющегося в сердцевине волокна. Оптимальные результаты были получены при мощности излучения на выходе волокна P = 8 мкВт/см^2. Далее, на этапе проявления торец волокна погружается в проявочную жидкость. Окончательно, образуется различимая структура в виде столбика длиной примерно 20 мкм на конце волокна с жестко закреплённой на кончике микрочастицей.

Форма и качество полученной микроструктуры контролируется с помощью наблюдения в оптический микроскоп и спектральных измерений. В данной работе использовался УФ отверждаемый цианакрилатный клей (NOA 61) для интеграции микроалмазов с NV-центрами с размером 3 мкм. На выходе из волокна с наконечником был получен спектр фотолюминесценции, характерный для использованных алмазов, подтверждающий возможность оптического возбуждения частицы в созданной микроструктуре (рис. 2).

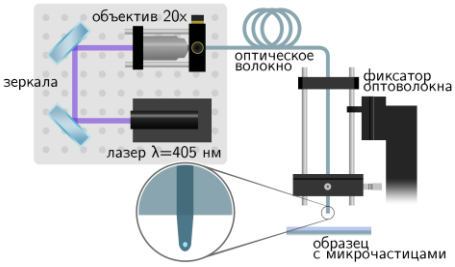


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для создания микроструктуры

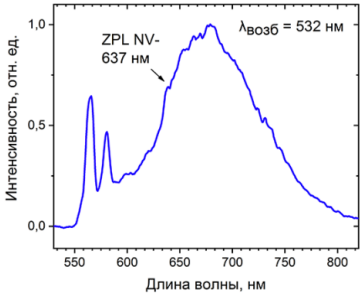


Рис. 2. Спектр фотолюминесценции на кончике микроструктуры

Список литературы

1. Đačanin-Far L., Dramićanin M. // Nanomater. 2023. V. 13 (21). P. 2904.
2. Vorobyov V. V., Soshenko V. V. // Eur. Phys. J. D. 2016. V. 70. P. 269.
3. Malallah R., Cassidy D., et al. // Appl. Opt. 2018. V. 25 (22). P. E80-E88.
4. Sukhorukov A.A., Shoji S., et al. // J. Nonlinear Opt. Phys. Mater. 2002. V. 11 (4). P. 391-407.

УДК 535(06)+004(06)

С.В. ВЛАСОВ, А.В. ИВАНОВ, А.Д. ИВАНОВ,
И.В. МАЛЫШЕВ, М.В. ПОПОВ
Российский квантовый центр, Сколково

ТАКТИЛЬНЫЕ СЕНСОРЫ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКИХ МИКРОВОЛОКОН

Были изготовлены прототипы тактильных сенсоров на основе тейперных оптических волокон. Их характеристики были исследованы посредством приложения вариативного точечного давления по площади их поверхности. Оценены оптимальные параметры геометрии тейперных волокон для сенсоров.

S.V. VLASOV, A.V. IVANOV, A.D. IVANOV,
I.V. MALYSHEV, M.V. POPOV
Russian Quantum Center, Skolkovo

OPTICAL MICROFIBER TACTILE SENSORS

Presents a tactile sensor based on a tapered optical microfiber. Prototypes of this sensor were manufactured. Characteristics of the prototypes were measured by applying variable point pressure throughout a sensor's area. Optimal parameters of tapered microfiber geometry were estimated.

В настоящий момент в робототехнике, при использовании роботов совместно с алгоритмами искусственного интеллекта, для получения информации об окружающем мире, активно используются тактильные сенсоры. Сигналы с таких датчиков помогают определить пятно давления при захвате, получить информацию о твёрдости предмета, его весе и центре масс. Это позволяет роботу оперировать со сложными предметами в таких задачах, как сортировка мусора, сборка хрупких механизмов и т.д.

Для выполнения этих задач тактильные сенсоры должны иметь необходимую чувствительность, пространственное разрешение и достаточную скорость работы. В настоящей работе предлагается использование тейперных оптических волокон в качестве тактильных сенсоров для улучшения технологии роботизированного захвата.

Тейперное волокно (от англ. – tapered fibre), которое также часто называют растянутым волокном, представляет собой оптическое волокно с локальным участком сужения диаметра, на котором часть излучения распространяется в оболочке или снаружи волокна [1, 2].

Принцип функционирования микроволоконных тактильных сенсоров основан на изменении пропускания при деформации суженного участка волокна за счёт возбуждения высших мод, из которых излучение затем выходит из волокна. Данный тип сенсора имеет преимущества перед другими типами сенсоров: скорость работы и простота детектирования сигнала. В настоящий момент разработка и усовершенствование данного типа сенсоров применяются в области электронной кожи [3]. Однако остаётся проблема качества и повторяемости изготовления тейперов. Также необходима доскональная характеризация параметров сенсора и улучшение способов его интеграции. Актуальна задача оптимизации параметров волокна и вспомогательного упругого материала, используемого совместно с тейпером.

Для анализа модового состава, межмодовых взаимодействий и эффектов, возникающих в тейперном волокне использовался коммерческий пакет программ Lumerical. Были получены оптимальные параметры геометрии тейперного волокна. Определён диапазон деформации суженного участка волокна, при котором достигается необходимый динамический диапазон чувствительности сенсора.

Для получения тейперных волокон использовалась установка, принцип работы которой основан на локальном нагреве и вытяжении волокна. В качестве источника тепла использовалась кислородно-водородная горелка.

На этой установке были произведены образцы тейперных волокон с пропусканием более 90 %. Их геометрия была исследована при помощи микроскопа с автоматизированной трансляцией. Были изготовлены прототипы тактильных сенсоров, характеристики которых были исследованы посредством приложения вариативного давления по площади поверхности датчика и измерения отклика в виде изменения пропускания оптического волокна. Прототип сенсора представлял собой рамку, в которую вклеено тейперное волокно, залитое полидиметилсилоксаном.

Затем прототип сенсора был интегрирован в роботизированный захват и опробован при выполнении задачи удержания предмета с последующим ослаблением силы захвата и детектированием проскальзывания предмета в момент выпадения. Первые результаты применения тактильных сенсоров показывают высокую чувствительность и скорость, необходимую для детектирования проскальзывания предметов.

Список литературы

1. Tong L., et al. // Opt. Comm. 2012. V. 285. P. 4641-4647.
2. Brambilla G., et al. // Adv. Opt. Photonics. 2009. V. 1. P. 107-161.
3. Zhang L., et al. // Opto-Electron. Adv. 2020. V. 3. P. 190022.

УДК 535(06)+004(06)

В.А. КОМИСАРОВ, А.А. ДМИТРИЕВ, С.В. ВАРЖЕЛЬ,
В.А. ЯКИМУК, А.И. КОЗЛОВА, Д.В. КАЛЯЗИНА
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ИЗГОТОВЛЕНИЕ НАКЛОННЫХ ЧИРПИРОВАННЫХ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЁТОК С ПОМОЩЬЮ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ТАЛЬБОТА

Приведены результаты экспериментов по формированию наклонных чирпированных волоконных брэгговских решёток (НЧВБР) в оптическом волокне стандарта G.657.A2. Определены спектральные характеристики получившихся решёток.

V.A. KOMISAROV, A.A. DMITRIEV, S.V. VARZHEL,
V.A. YAKIMUK, A.I. KOZLOVA, D.V. KALIAZINA
ITMO University, Saint-Petersburg

TILTED CHIRPED FIBER BRAGG GRATINGS FABRIATION BY TALBOT INTERFEROMETER

The results of experiments on the tilted chirped fiber Bragg gratings formation in optical G.657.A2 are presented. Spectral characteristics of the gratings were determined.

Волоконные брэгговские решётки (ВБР) могут использоваться в качестве оптических фильтров в различных областях телекоммуникаций и оптической волоконной сенсорики [1, 2]. В обоих применениях требуется запись решёток с возможностью изменения центральной длины волны резонанса. Широкая перестройка указанного параметра ВБР легко достигается применением схемы записи решёток на основе интерферометра Тальбота [3].

Целью работы является получение наклонных чирпированных волоконных брэгговских решёток, которые могут использоваться для выравнивания спектра усиления в квантовом усилителе на основе эрбиевого волокна. Основные компоненты схемы записи ВБР: KrF-эксимерный лазер «Optosystems MOPA CL-7550» с центральной длиной волны излучения 248 нм, интерферометр Тальбота, где в качестве светоделительного элемента используется фазовая маска размером 25 х 10 мм, центральным периодом 700 нм и изменением периода по длине 1 нм/см, поворотный узел для закрепления оптического волокна.

Решётки длиной 15 мм записывались в волокно G657.A2, угол наклона волокна относительно нормали к штрихам интерференционной картины составляет 1,6 и 2 °. Спектр пропускания, который необходимо получить показан на рис. 1 сплошной линией, спектр решётки, записанной под углом наклона волокна 1,6 °, представлен пунктирной линией, а спектр решётки, записанной под углом наклона волокна 2 ° – штрих-пунктирной линией.

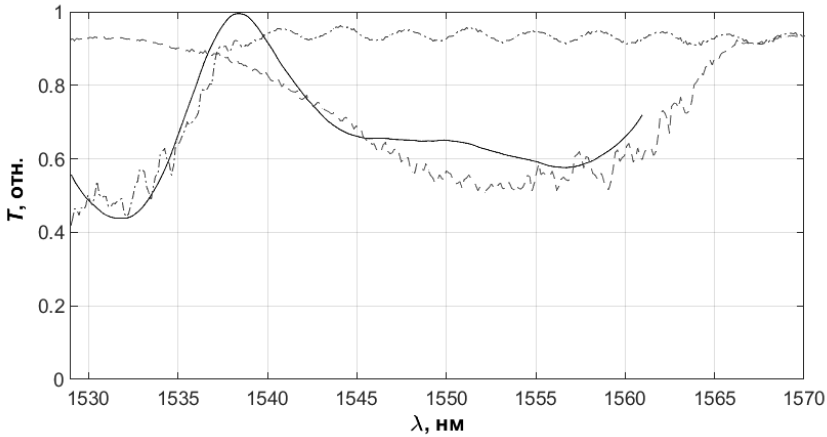


Рис. 1. Спектры полученных решёток

Список литературы

1. Chen J., Liu B., Zhang H. Review of fiber Bragg grating sensor technology // Frontiers of Optoelectronics in China. 2011. V. 4. No. 2. P. 204-212.

2. Osuch T., et al. Development of fiber Bragg gratings technology and their complex structures for sensing, telecommunications and microwave photonics applications // Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences. Polska Akademia Nauk. Czytelnia Czasopism PAN, 2014. V. 62. No. 4. P. 627-633.

3. Gribaev A., et al. Laboratory setup for fiber Bragg gratings inscription based on Talbot interferometer // Optical and Quantum Electronics. 2016. V. 48.

З.А. ЗАБАЛУЕВА, А.В. КОРЧАГИНА, Н.А. УШАКОВ
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ИССЛЕДОВАНИЕ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ ОДНОМОДОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН ПРИ ПОМОЩИ СПЕКТРАЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ КОГЕРЕНТНОЙ ТОМОГРАФИИ

Свойства оптических волокон тесно связаны с их геометрическими размерами и свойствами материалов, из которых они изготовлены. Поэтому для точного контроля и прогнозирования свойств оптических волокон желательно выполнять неразрушающие измерения их внутренней структуры, предпочтительно без доступа к торцевой поверхности. Одним из возможных способов проведения такого измерения является применение оптической когерентной томографии, которая является интерферометрическим неинвазивным методом контроля. Однако его пространственное разрешение должно быть улучшено, что и делается в данной работе с помощью методов параметрической спектральной оценки.

Z.A. ZABALUEVA, A.V. KORCHAGINA, N.A. USHAKOV
Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

STUDY OF SINGLEMODE OPTICAL FIBERS' INTERNAL STRUCTURE USING SPECTRAL-DOMAIN OPTICAL COHERENCE TOMOGRAPHY

Properties of optical fibers are strongly related to their geometric dimensions and the properties of the materials they are made of. Therefore, for precise inspection and prediction of optical fibers properties it is desirable to perform non-destructive measurement of their internal structure, preferably without accessing the end-face. One of the possible ways to perform such a measurement is application of optical coherence tomography, which is an interferometric non-invasive inspection method. However, its spatial resolution must be improved, which is done in this work by means of parametric spectral estimation methods.

Оптическая когерентная томография (ОКТ) [1] позволяет неинвазивно получать трёхмерные изображения прозрачных и полупрозрачных объектов за счёт анализа зависимости интерференции света от длины волны. ОКТ широко применяется в биомедицинских применениях [2, 3], также известны приложения ОКТ для исследования внутренней структуры многомодовых оптических волокон [4], однако, аналогичные

применения к визуализации структуры одномодовых и двулучепреломляющих волокон сопряжены с рядом сложностей, вызванных ограниченной пространственной разрешающей способностью ОКТ ΔL, которая связана с шириной спектрального диапазона $\Delta\lambda$, в котором измеряется интерференционный сигнал следующим образом

$$\Delta L = k\,\lambda_0^2/(2\Delta\lambda),$$

где λ_0 – центральная длина волны, а коэффициент k имеет величину порядка единицы и связан с формой спектра используемого источника.

С одной стороны, возможно улучшение пространственной разрешающей способности ОКТ за счёт увеличения ширины спектрального интервала, в котором регистрируется интерференционный сигнал. С другой стороны, реализовать измерение спектрального интерференционного сигнала в широком диапазоне длин волн затруднительно с технической точки зрения.

В традиционных ОКТ-системах интерференционный сигнал обрабатывается при помощи дискретного преобразования Фурье, в результате чего формируется продольное пространственное распределение коэффициента отражения образца, обычно именуемое А-сканом. Для нахождения А-скана также возможно применение методов, аналогичных преобразованию Фурье, но способных обеспечить разрешение интерференционных компонент, разности оптических путей которых различаются меньше, чем на величину ΔL. Такие возможности обеспечивает ряд методов параметрической спектральной оценки, например, методы MUSIC и ESPRIT, предполагающие, что анализируемый сигнал является суперпозицией гармонических компонент.

В работе исследуется зависимость достижимой продольной пространственной разрешающей способности ОКТ при вычислении А-сканов при помощи методов MUSIC и ESPRIT от отношения сигнал-шум интерференционного сигнала, количества интерференционных компонент в сигнале и числа компонент, параметры которых оцениваются. Проведены измерения внутренней структуры ряда оптических волокон при их боковой засветке ОКТ-зондом, хорошо согласующиеся с измерениями, проведёнными с торца волокна при помощи микроскопа.

Список литературы

1. Huang D., Swanson E.A., et al. // Science. 1991. V. 254 (5035). P. 1178.
2. Podoleanu A.G. // Journal of Lightwave Technology. 2010. V. 28, P. 624-640.
3. Leitgeb R.A., Placzek F., et al. // Journal of Biomedical Optics. 2021. V. 26, P. 100601.
4. Saccon F.A.M., Muller M.. Fabris J.L. // 2009 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), 2009. P. 625-628.

УДК 535(06)+004(06)

А.А. ЗЫКИНА, С.А. ПЛЯСЦОВ, И.А. ГЛАДСКИХ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА НА ОСНОВЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАЗМОННОГО РЕЗОНАНСА И MMF-SMF-MMF ВОЛОКНА

Представленная работа посвящена моделированию физического процесса, происходящего в чувствительном элементе рефрактивного датчика на основе поверхностного плазмонного резонанса (ППР) и соединения MMF-SMF-MMF оптических волокон. Результаты моделирования показали хорошую корреляцию с экспериментальными данными. Данная модель необходима для определения оптимальной толщины диэлектрического покрытия в чувствительном элементе для сдвига ППР в ИК-область.

A.A. ZYKINA, S.A. PLYASTSOV, I.A. GLADSKIKH
ITMO University, Saint-Petersburg

MODELING OF A FIBER-OPTICAL SENSOR BASED ON SURFACE PLASMON RESONANCE AND MMF-SMF-MMF FIBER

The results of modeling of the physical process occurring in the sensing element of a refractive sensor based on surface plasmon resonance and the connection of MMF-SMF-MMF optical fibers were presented, which showed a good correlation with the experimental data. This model is necessary to determine the optimal thickness of the dielectric coating in the sensitive element for shifting the SPR to the IR range.

Оптические биосенсорные системы на основе поверхностного плазмонного резонанса (ППР) представляют собой перспективное направление для обнаружения остатков антибактериальных препаратов в пищевой промышленности. Эти системы отличаются высокой чувствительностью, селективностью и оперативностью получения результатов, что делает их идеальным выбором для работы вне лабораторных условий [1].

Для упрощения конструкции и уменьшения габаритов биосенсора в качестве чувствительного элемента можно использовать оптическое волокно, с нанесённым сверху металлическим покрытием (медь 50 нм) для создания эффекта ППР. Для опроса такого чувствительного элемента предлагается использовать лазер с вертикально излучающим резонатором

(VCSEL), который позволит повысить чувствительность датчика, так как обладает достаточно узким спектром. Однако при такой конструкции появляется несоответствие рабочих диапазонов: спектры ППР меди лежат в видимом диапазоне, а рабочая длина волны излучения VCSEL лежит в ИК-области. Для решения данной проблемы предлагается сдвинуть спектр ППР в ИК-область путём нанесения на оптическое волокно дополнительного диэлектрического покрытия (Al_2O_3) [2]. Расчёт необходимой толщины Al_2O_3 с помощью математической модели чувствительного элемента является целью данной работы.

В качестве чувствительного элемента датчика было выбрано соединение MMF-SMF-MMF волокна, так как оно обладает хорошими эксплуатационными характеристиками: простотой изготовления, повторяемостью характеристик и механической прочностью [3, 4]. Длина участка одномодового волокна составила 15 - 17 мм и была приварена к двум достаточно длинным участкам многомодового волокна. Моделирование чувствительного элемента проводилось с помощью программного обеспечения Mathcad на основе уравнений Френеля. Исследуемый диапазон длин волн составил 500 - 2000 нм, а диапазон показателя преломления исследуемой среды – 1,33 - 1,43.

Для получения резонансных кривых была рассчитана интенсивность отражённого излучения в схеме Кречмана с помощью приближений геометрической оптики с пределами интегрирования по углам падения лучей, вычисленных на основе числовой апертуры волокна [5]. Для проведения экспериментальной проверки модели чувствительный элемент был подключён к широкополосному источнику (галогеновая лампа AlfaBright с оптоволоконным выходом). Спектры отражения были получены с помощью спектрометра АВЕСТА ASP-150. Результаты моделирования показывают хорошую корреляцию с экспериментальными данными.

Список литературы

1. Алсовэйди А.К.М., Караваева О.А., Гулий О.И. Методы и подходы для определения антибиотиков // Антибиотики и химиотер. 2022. Т. 67. № 1-2. С. 53-61.

2. Ma Y., et al. FOM enhancement of a D-shaped SPR fiber sensor based on Al_2O_3–graphene–platinum grating //Journal of Optics. 2023. P. 1-9.

3. Iga M., Seki A., Watanabe K. Hetero-core structured fiber optic surface plasmon resonance sensor with silver film // Sensors and Actuators B: Chemical. 2004. V. 101. No. 3. P. 368-372.

4. Takagi K., et al. Surface plasmon resonances of a curved hetero-core optical fiber sensor // Sensors and Actuators A: Physical. 2010. V. 161. No. 1-2. P. 1-5.

5. Yamamoto M. Surface plasmon resonance (SPR) theory: tutorial // Review of Polarography. 2002. V. 48. No. 3. P. 209-237.

Н.И. ГОРЛОВ, Д.А. ТАЛАНОВ
Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Новосибирск

РАСПРЕДЕЛЁННОЕ ВОЛОКОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ МАНДЕЛЬШТАМА–БРИЛЛЮЭНА

В докладе представлены функциональные зависимости угловой частоты акустической волны и бриллюэновского частотного сдвига от параметров оптического волокна и длины волны накачки. Приведены схемные реализации бриллюэновской оптической рефлектометрии и оптического анализа во временной области.

N.I. GORLOV, D.A. TALANOV
Siberian State University of Telecommunications and Informatics, Novosibirsk

DISTRIBUTED FIBER SENSING BASED ON BACKSCATTERING MANDELSTAM–BRILLOUIN

The paper presents the functional dependences of the angular frequency of the acoustic wave and the Brillouin frequency shift on the parameters of the optical fiber and the pumping wavelength. Schematic implementations of Brillouin optical reflectometry and optical analysis in the time domain are presented.

Рассеяние Мандельштама–Бриллюэна происходит от термически возбуждённых акустических волн [1]. Его можно также эквивалентно рассматривать как рассеяние света акустическими фононами. Неупругое взаимодействие фотона и фонона в кварцевом оптическом волокне приводит к частотному сдвигу рассеянного света, который зависит от скорости звуковой волны. Этот сдвиг частоты можно также рассматривать как доплеровский сдвиг оптического пучка, падающего на дифракционную решётку, движущуюся со скоростью звука [2]. В общем случае термоиндуцированная акустическая волна не имеет предпочтительного направления распространения. Угловая частота акустической волны может быть определена как [3]

$$\omega_B = 2V_A \left|k_p\right| \sin(\theta_p / 2), \qquad (1)$$

где: V_A – скорость акустической волны; k_p – волновой вектор; θ_p – угол между волной накачки и волной Стокса.

В оптических волокнах рассеяние направлено в прямом и обратном направлениях вдоль волокна. Согласно уравнению (1), бриллюэновский сдвиг частоты в прямом направлении ($\theta = 0$) исчезает, тогда как в обратном направлении ($\theta = \pi$) он максимален. Поэтому бриллюэновский частотный сдвиг может быть выражен как [3]

$$\nu_B = \frac{\omega_B}{2\pi} = \frac{2nV_a}{\lambda_p}, \qquad (2)$$

где: n – коэффициент преломления материала сердцевины; λ_p – длина волны накачки.

Методы зондирования на принципе рассеяния Бриллюэна делятся на два вида: 1) бриллюэновская оптическая рефлектометрия во временной области, схемная реализация которой представлена на рис. 1; 2) бриллюэновский оптический анализ во временной области, схемная реализация которого представлена на рис. 2.

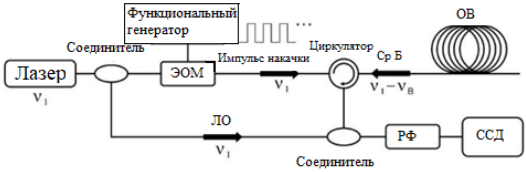


Рис. 1. Схемная реализация бриллюэновской оптической рефлектометрии во временной области

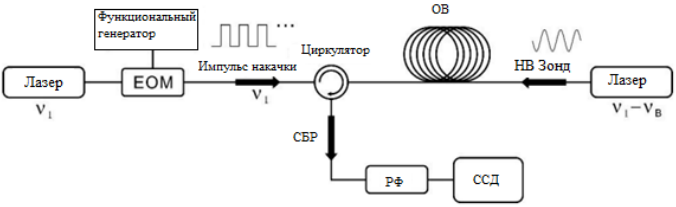


Рис. 2. Схемная реализация бриллюэновского оптического анализа во временной области

Список литературы

1. Chiao R., Townes C., Stoicheff B. Stimulated Brillouin scattering and coherent generation of intense hypersonic waves // Physical Review Letters. 1964. V. 12 (21). P. 592.

2. Oberson P., Huttner B., Gisin N. Frequency modulation via the Doppler effect in optical fibers // Optics Letters. 1999. V. 24 (7). P. 451-453.

3. Horiguchi T., Tateda M. Optical-fiber-attenuation investigation using stimulated Brillouin scattering between a pulse and a continuous wave // Optics Letters. 1989. V. 14 (8). P. 408-410.

УДК 535(06)+004(06)

В.В. ЮШИЦЫНА, А.П. ПЛЁНКИН
Институт компьютерных технологий и информационной безопасности Южного федерального университета, Таганрог

КВАНТОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КЛЮЧЕЙ В СИСТЕМЕ «БЕЗОПАСНЫЙ ГОРОД»

Описан основной способ использования систем квантового распределения ключа в телекоммуникационной системе «Безопасный город» с целью обеспечения повышенной защищённости передаваемых данных. Приведено описание конфигурации структурированной кабельной системы, показана модель интеграции системы квантового распределения ключа в протоколы шифрования данных сети «Безопасный город», проведён расчёт потерь в квантовом канале связи.

V.V. YUSHITSYNA, A.P. PLJONKIN
Institute of Computer Technologies and Information Security of Southern Federal University, Taganrog

QUANTUM KEY DISTRIBUTION IN THE SAFE CITY SYSTEM

The main method of using quantum key distribution systems in the Safe City telecommunications system is described in order to ensure increased security of transmitted data. A description of the configuration of a structured cabling system is given, a model for integrating a quantum key distribution system into the data encryption protocols of the Safe City network is shown, and losses in a quantum communication channel are calculated.

Для повышения мер безопасности информационных систем, происходит постоянное внедрение передовых технологий. Наиболее перспективным и устойчивым методом защиты передаваемых данных в различных системах является квантовая криптография, а точнее интеграция систем квантового распределения ключей (СКРК) в телекоммуникационную систему с целью получения пар уникальных ключей.

Телекоммуникационная система «Безопасный город» [1] направлена на создание защищённой среды за счёт использования камер видеонаблюдения, различных датчиков и анализа данных. В условиях растущей угрозы кибератак [3], обеспечение целостности и конфиденциальности данных, которыми обмениваются эти системы, имеет первостепенное значение. Использование КРК для обеспечения

защищённости передаваемых данных в системе «Безопасный город» представляется актуальной задачей [2]. Системы КРК, используя поведение квантовых частиц, позволяют создавать ключи шифрования, устойчивые к подслушиванию и перехвату данных. В отличие от традиционных методов шифрования, система квантового распределения ключей базируются на фундаментальных свойствах квантовой физики.

Мы рассматриваем применение систем квантового распределения ключей в инфраструктуре «Безопасного города» на примере подсистемы цифрового видеонаблюдения, где в качестве каналов связи применяется волоконно-оптические проводники. Большинство систем видеонаблюдения не имеют дополнительной защиты от атак или проникновения. В таких системах практически не используются средства шифрования, а часть систем имеет беспрепятственный доступ через интернет. Злоумышленник при помощи таких данных может, например, отследить необходимый маршрут, скопление людей или интересующий объект. Последнее можно рассматривать как уязвимость в системе обеспечения безопасности города и государства.

Как следствие последнего, использование систем квантовой связи (систем квантового распределения ключа) для обеспечения повышенной защищённости структурированных телекоммуникационных систем в контексте «Безопасного города» будет являться эффективным решением [3]. Отметим, что при интеграции квантового ключа в алгоритм шифрования данных целесообразно модифицировать время жизни ключа и его длину. Также актуальным является применение метода XOR. При этом происходит смешивание квантового ключа с классическим криптографическим ключом. Последнее позволяет применять один квантовый ключ в нескольких модификациях конечного смешанного ключа [4].

Список литературы

1. Власова Н.Ю. От безопасного города к умному городу: стратегический подход // Экономико-правовые проблемы обеспечения экономической безопасности: материалы Всероссийской научно-практической конференции. Екатеринбург: Уральский государственный экономический университет, 2018. С. 163-166.

2. Gisin N., Ribordy G., Tittel W., Zbinden H. Quantum cryptography // Reviews of Modern Physics. 2002. V. 74. No. 1. P. 145-195.

3. Pljonkin A., Petrov D., Sabantina L., Dakhkilgova K. Nonclassical attack on a quantum key distribution system // Entropy. 2021. V. 23. P. 509.

4. Брагин И.О., Юшицына В.В. Защищенный канал связи на основе квантового распределения ключей // Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности: Сборник статей Всероссийской научно-технической конференции. Таганрог: Южный федеральный университет, 2023. С. 46-47.

УДК 535(06)+004(06)

Т.А. МАКОВЕЦКАЯ, Н.А. УШАКОВ
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОФОТОННОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ АБСОЛЮТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

В работе теоретически рассматривается интерференционный метод измерения расстояний в условиях интерференции трёх и более коррелированных фотонов. В качестве интерференционного сигнала предполагается использование вероятности совместного детектирования фотонов по аналогии с бифотонной интерферометрией и частотно-селективных фильтров на выходе интерферометра. Рассмотрены методы обработки многомерных зависимостей вероятности совместного детектирования фотонов от их частот, позволяющие подавить влияние паразитной интерференции низших порядков.

T.A. MAKOVETSKAYA, N.A. USHAKOV
Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

APPLICATION OF MANY-PHOTON SPECTRAL-DOMAIN INTERFEROMETRY FOR ABSOLUTE OPTICAL MEASUREMENTS

We theoretically consider an interference method for distance measurement under conditions of interference of three or more correlated photons. As an interference signal, it is assumed to use the probability of joint detection of photons by analogy with biphoton interferometry and frequency-selective filters at the output of the interferometer. Methods for processing multidimensional dependences of the probability of joint detection of photons on their frequencies are considered, which make it possible to suppress the influence of parasitic interference of lower orders.

Относительно хорошо изученные в квантовой оптике бифотонные состояния показали свою эффективность в измерительных интерференционных задачах, включая высокоточные измерения расстояний [1], квантовую оптическую когерентную томографию [2], измерения недетектируемыми фотонами [3] и ряд других применений. Предложенные подходы спектральной бифотонной интерферометрии [4 - 6] позволяют улучшить разрешающую способность и повысить механическую стабильность интерферометрической установки. В то же время, при использовании коррелированных фотонных состояний

разрешающая способность интерференционных измерений улучшается пропорционально количеству фотонов в коррелированном состоянии.

В работе рассматривается интерференция трёхфотонного состояния, характеризуемого совместным спектральным распределением вероятности и влияние параметров распределения на вероятность совместного детектирования фотонов. Рассмотрен случай трёхплечевого интерферометра, при этом вероятность попадания фотонов в разные плечи интерферометра одинакова. Теоретически показано, что интерференционный сигнал состоит из большого количества интерференционных слагаемых, осциллирующих по отношению к частотам фотонов, при этом частоты осцилляций соотносятся с оптическими длинами плеч и их линейными комбинациями.

В результате проведённых аналитических выкладок показано, что группируя интерференционные компоненты и производя замену переменных на линейные комбинации частот фотонов, интерференционный сигнал может быть представлен как полигармонические осцилляции в четырёхмерном пространстве (вероятность совместного детектирования представленная как функция трёх линейных комбинаций частот фотонов). В свою очередь, в данном пространстве можно найти вектор, вдоль которого вероятность совместного детектирования фотонов является функцией только оптических длин плеч, а не их комбинаций. Таким образом, в отличие от бифотонной интерферометрии, интерферометрия на основе трёхфотонных коррелированных состояний позволяет подавить влияние паразитных интерференционных компонент при произвольных параметрах совместного спектрального распределения, сохраняя при этом свойство подавления влияния хроматической дисперсии на интерференционный сигнал и обеспечивая возможность улучшения разрешающей способности по разрешению близких разностей оптических путей.

Список литературы

1. Chen Y., Fink M., Steinlechner F., Torres J.P., Ursin R. // npj Quantum Inf. 2019. V. 5. P. 43.
2. Nasr M.B., Saleh B.E., Sergienko A.V., Teich M.C. // Phys. Rev. Lett. 2003. V. 91 (8). P. 8.
3. Katamadze K.G., Avosopiants G.V., Bogdanov Yu.I., Kulik S.P., // Optica. 2018. V. 5. P. 723.
4. Ushakov N.A., Makovetskaya T.A., Markvart A.A., Liokumovich L.B. // JETP Lett. 2023. V. 117 (1). P. 24-31.
5. Ushakov N.A., Markvart A.A., Liokumovich L.B. // JOSA B. 2022. V. 39 (11). P. 2905.
6. Yepiz-Graciano P., Martínez A.M.A., Lopez-Mago D., Cruz-Ramirez H., U'Ren A.B. // Photonics Res. 2020. V. 8. P. 1023.

УДК 535(06)+004(06)

Я.В. ПРЖИЯЛКОВСКИЙ, Н.И. СТАРОСТИН, С.К. МОРШНЕВ, А.И. САЗОНОВ

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТОКА ПЛАЗМЫ В ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКТОРАХ

Электрический ток, измеряемый Фарадеевским волоконно-оптическим датчиком интерферометрическим способом, ограничен значением около 500 кА. Для измерения больших токов, вплоть до нескольких десятков мегаампер, мы предлагаем использовать дифференциальное измерение тока с помощью двух spun волокон обладающих разной чувствительностью и намотанные вокруг проводника с током в противоположных направлениях. В эксперименте продемонстрировано увеличение предельного значения измеряемого тока до 50 МА.

Ya.V. PRZHIYALKOVSKIY, N.I. STAROSTIN, S.K. MORSHNEV, A.I. SAZONOV

Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS

FIBER-OPTIC SENSOR FOR PLASMA CURRENT MEASUREMENT IN FUSION REACTORS

The electric current measured by the interferometric fiber sensor is limited to a value of approximately 500 kA. To measure larger currents, up to several tens of megaamperes, we propose differential current measurement using two spun fibers of different sensitivity wound in opposite directions around the current conductor. An increase of the measurement current limit to 50 MA has been experimentally demonstrated.

Волоконно-оптические датчики электрического тока на основе эффекта Фарадея в настоящее время получили широкую популярность в высокоэнергетической промышленности благодаря своей точности, безопасности и простоте монтажа. Самой распространённой реализацией этого метода измерения тока является волоконный отражательный интерферометр с использованием в качестве чувствительного элемента волокна со спиральной структурой встроенного линейного двулучепреломления (spun волокно) [1]. Диапазон измеряемых токов в таком датчике ограничивается максимальным значением Фарадеевского фазового сдвига $\varphi < \pi/2$, что соответствует току $I_{max} \approx 500$ кА. Однако в

некоторых задачах, таких как, например, измерение тока плазмы в термоядерных реакторах, измеряемый ток может превышать этот предел, достигая значения в несколько МА [2].

В данной работе мы предлагаем дифференциальный метод измерения тока волоконным датчиком, основанный на вариации чувствительности spun волокна. Для этого чувствительный элемент датчика выполняется из двух последовательно соединённых spun волокон с разным двулучепреломлением или периодами шага спиральной структуры и охватывающих проводник с током в противоположных направлениях (рис. 1). Из-за различия параметров, эллиптичность поляризационных мод в волокнах будет разной, в результате чего также будет разной и чувствительность к эффекту Фарадея [3]. Если эта разность невелика, то после обхода света всего волоконного контура остаточный фазовый сдвиг будет намного меньше сдвига, индуцированного в обычном чувствительном контуре, выполненным из одного spun волокна. Сниженная таким образом интегральная чувствительность датчика и даёт увеличение верхнего предела измеряемого тока. Экспериментально была продемонстрирована возможность измерять ток величиной до 50 МА. Для этого использовались spun волокна с периодом спиральной структуры 3,1 мм и длинами биений двулучепреломления 7,1 мм и 10,7 мм на длине волны $\lambda = 1{,}55$ мкм.

Работа выполнена в рамках Госзадания № 075-01110-23-01 ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

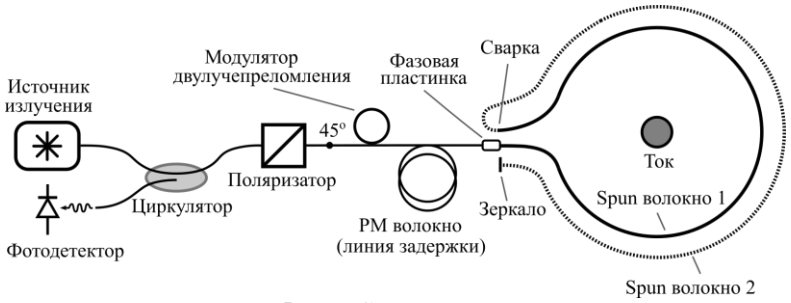


Рис. 1. Схема датчика

Список литературы

1. Bohnert K., et al. // Optics and Lasers in Engineering. 2005. V. 43 (3-5). P. 511-526.

2. Gusarov A., et al. // Fusion Engineering and Design. 2018. V. 136. P. 477-480.

3. Przhiyalkovskiy Ya.V., et al. // Journal of Lightwave Technology. 2020. V. 38 (24). P. 6879-6885.

УДК 535(06)+004(06)

В.С. АНПИЛОВ[1,2], Н.В. КОВАЛЕНКО[2], О.А. РЯБУШКИН[1,2]
[1]Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный
[2]Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ГИДРОФОН НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ–ПЕРО ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ КАВИТАЦИОННЫХ ПУЗЫРЬКОВ В ВОДЕ

Был разработан волоконно-оптический датчик акустических колебаний на основе интерферометра Фабри–Перо с помощью нанесения полимера СИЭЛ-305 на торец одномодового волокна для детектирования лазерно-индуцированных кавитационных пузырьков в воде.

V.S. ANPILOV[1,2], N.V. KOVALENKO[1], O.A. RYABUSHKIN[1,2]
[1]Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny
[1]Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS

FIBER - OPTIC HYDROPHONE BASED ON POLYMER INTERFEROMETER FABRY–PEROT FOR REGISTRATION OF LASER -INDUCED CAVITATION BUBBLES IN WATER

A fiber-optic acoustic vibration sensor based on the Fabry–Perot interferometer was developed by applying the CIEL-305 polymer to the end of a single-mode fiber to detect laser-induced cavitation bubbles in water.

Для задач детектирования ультразвука под водой, возникающего, в частности, при схлопывании кавитационных пузырьков, всё большее распространение получают волоконно-оптические гидрофоны благодаря высокой чувствительности измерений, коррозийной стойкости и простоты изготовления [1]. Простейшим датчиком акустических колебаний можно назвать интерферометр Фабри–Перо [2], в качестве которого могут выступать тонкий слой полимера или пара диэлектрических зеркал с упругой прокладкой между ними [3], сформированные на торце волокна.

В данной работе представлен волоконно-оптический гидрофон, с нанесённым на торец одномодового оптического волокна, диаметром оболочки 125 мкм и жилы 6 мкм, полимера СИЭЛ-305, оптически прозрачного для используемой длины волны.

Интерферометр, фотография которого представлена на рис. 1а, был сформирован на основе торцевой поверхности кварцевого волокна, на которую наносилась тонкая полимерная плёнка. Толщина полимерного слоя *l*, измеренная на оси волокна, составляла 15÷40 мкм.

На рис. 1б представлена схема экспериментальной установки. Импульсное оптическое излучение с длиной волны 1940 нм, пиковой мощностью 500 Вт и длительностью 1 мс поглощалось в воде и приводило к образованию кавитационных пузырьков. Непрерывное оптическое излучение с длиной волны 1064 нм мощностью 1 Вт проходило через волоконный ответвитель (1 %) и направлялось на датчик, погружённый в воду. Часть отражённого излучения направлялась на фотодетектор, сигнал с которого регистрировался осциллографом. Кинетика амплитуды нормированного напряжения представлена на рис. 2, на котором видна временная область (≈ 1 мс) резкого изменения сигнала.

Таким образом, в работе представлена блок-схема экспериментального стенд для регистрации акустических откликов лазерноиндуцированных кавитационных пузырьков с помощью волоконно-оптического гидрофона на основе полимерного интерферометра Фабри–Перо на торце кварцевого волокна, изготовленного из коммерчески доступных материалов.

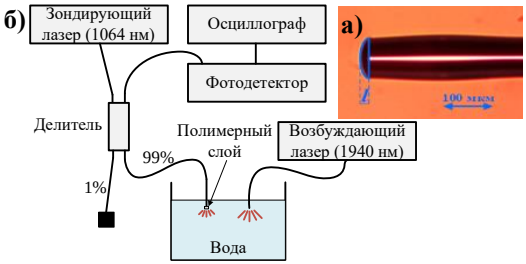


Рис. 1. Снимок волокна с полимером (синяя область) на торце под микроскопом (а), блок-схема экспериментальной установки (б)

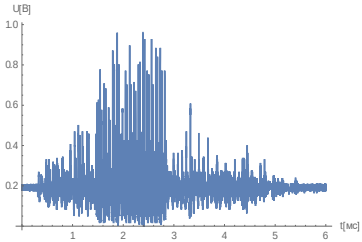


Рис. 2. Осциллограмма акустических колебаний

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Список литературы

1. Akhatov I., et al. Collapse and rebound of a laser-induced cavitation bubble // Physics of Fluids. 2001. V. 13. No. 10. P. 2805-2819.

2. Beard P.C., Mills T.N. Extrinsic optical-fiber ultrasound sensor using a thin polymer film as a low-finesse Fabry–Perot interferometer // Applied Optics. 1996. V. 35. No. 4. P. 663-675.

3. Ansari R., et al. All-optical forward-viewing photoacoustic probe for high-resolution 3D endoscopy // Light: Science & Applications. 2018. V. 7. No. 1. P. 75.

УДК 535(06)+004(06)

А.Х. АХМЕРОВ, С.Д. СЫЧЕВА
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

СИСТЕМА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КАПИЛЛЯРНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ АКТИВНОГО КВАЗИРАСПРЕДЕЛЕННОГО ОПТОВОЛОКОННОГО АКУСТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА

Предложена архитектура системы неразрушающего контроля капиллярных объектов, основанная на применении согласованных массивов пьезоактуаторов и квазираспределённого волоконного акустического датчика на основе брэгговских решёток, мультиплексированных в едином волокне. Рассматриваются преимущества и сложности реализации предлагаемой системы.

A.Kh. AKHMEROV, S.D. SYCHEVA
ITMO University, Saint-Petersburg

NON-DESTRUCTIVE CAPILLARY OBJECT TESTING SYSTEM BASED ON AN ACTIVE QUASI-DISTRIBUTED FIBER OPTIC ACOUSTIC SENSOR

Presents the proposed system architecture for capillary object non-destructive testing. The system is based on the piezoelectric transducer phased array and quasi-distributed acoustic sensor that consists of multiple Bragg gratings multiplexed in a single optical fiber. Considers the advantages and difficulties of the proposed system implementation and application.

Среди методов контроля целостности капиллярных объектов, как техногенных, так и естественных, акустические являются наиболее универсальными и обладают сопоставимой с другими методами эффективностью. Одним из актуальных направлений исследований является применение распределённых и квазираспределённых датчиков и средств искусственного интеллекта, обеспечивающих автоматизацию обнаружения, локализации и классификации повреждений [1 - 3].

В данном исследовании предлагается оптико-акустический метод для решения задачи контроля целостности капиллярных объектов. В основе лежит формирование опорного сканирующего акустического сигнала за счёт распределенной структуры пьезоактуаторов, и его регистрация при помощи квазираспределенного оптоволоконного акустического датчика. Архитектура системы на основе этого метода представлена на рис. 1.

Для реализации предлагаемого метода на объекте контроля с заданной периодичностью размещается оптическое волокно, в котором записаны слабые брэгговские решётки, мультиплексированные как по временной области, так и по длине волны [3]. При проведении диагностики, на объект контроля дополнительно устанавливаются массивы пьезоактуаторов, формирующие сканирующий акустический сигнал. Основной особенностью предлагаемого метода и архитектуры является универсальность. Квазираспределённый датчик может обеспечить постоянный мониторинг акустико-эмиссионным, либо температурным методом [4]. Использование массива пьезоактуаторов позволит как сформировать плоские направленные волны для контроля протяжённых участков капилляра, так и сфокусировать волны для снятия эхосигнала с определенной точки [5, 6].

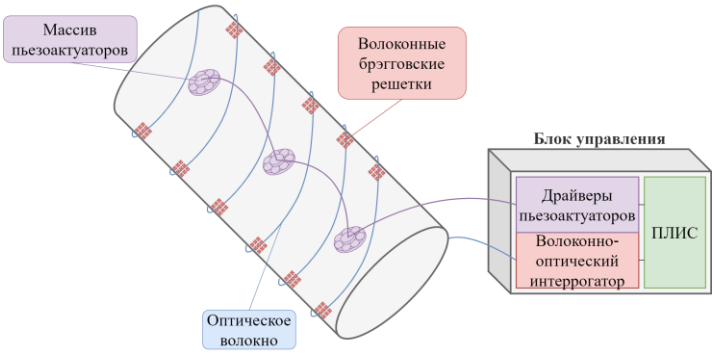


Рис. 1. Обобщённая архитектура системы диагностики капиллярных объектов

Список литературы

1. Bao X. Prospects on ultrasound measurement techniques with optical fibers // Measurement Science and Technology. 2023. V. 34. No. 5. P. 051001.

2. Shang Y., et al. Research progress in distributed acoustic sensing techniques // Sensors. 2022. V. 22. No. 16. P. 6060.

3. Luo Z., et al. A time-and wavelength-division multiplexing sensor network with ultra-weak fiber Bragg gratings // Optics Express. 2013. V. 21. No. 19. P. 22799-22807.

4. Jinachandran S., Rajan G. Fibre Bragg grating based acoustic emission measurement system for structural health monitoring applications // Materials. 2021. V. 14. No. 4. P. 897.

5. Lalam N., Wright R.F., Ohodnicki P.R. Pipeline monitoring based on ultrasonic guided acoustic wave and fiber optic sensor fusion // Proc. SPIE. 2022. V. 12105. P. 67-73.

6. Taheri H., Hassen A.A. Nondestructive ultrasonic inspection of composite materials: A comparative advantage of phased array ultrasonic // Applied Sciences. 2019. V. 9. No. 8. P. 1628.

УДК 535(06)+004(06)

Н.А. УС, А.А. АВЕРШИН, Н.С. ПЕЧЕНКИН, В.К. ДМИТРИЕВ
Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, Воронеж

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ РАЗВЕТВИТЕЛЬ ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ГИРОСКОПА

Представлено конструктивно-технологическое решение лазерного гироскопа с пассивным оптическим контуром, за счёт применения волоконно-оптического разветвителя. Применение такой конструкции снижает температурную нестабильности устройства и повышает эффективность использования лучистой энергии полупроводникового лазера.

N.A. US, A.A. AVERSHIN, N.S. PECHENKIN, V.K. DMITRIYEV
Air Forces Academy named after Prof. N.E. Zhukovskiy and Yu.A. Gagarin, Voronezh

FIBER OPTIC SPLITTER FOR LASER GYROSCOPE

A constructive and technological solution of a laser gyroscope with a passive optical contour, due to the use of a fiber-optic splitter, is presented. The use of such a design reduces the temperature instability of the device and increases the efficiency of using the radiant energy of a semiconductor laser.

В исследовании рассматривается возможность реализации лазерного гироскопа с пассивным оптическим контуром, за счёт применения волоконно-оптического разветвителя [1].

На рис. 1 представлен многоугольный оптический моноблок *1* изготовленный из органического стекла, в котором сформированы цилиндрические каналы *2* в вершинах которых расположены два зеркала *3* и преобразователь для съёма информации в виде лучистой энергии интерференционной картины, совмещённый с полупрозрачным сферическим зеркалом *4*. Два дополнительно сформированных оптических канала *5* в моноблоке *1*, предназначены для подачи/накачки оптического контура гироскопа лучистой энергией от полупроводникового лазера *7* через внешний оптический разветвитель *6*. В итоге, излучение от полупроводникового лазера *7* через внешний оптический разветвитель *6* формируется в виде двух параллельных пучков, которые по двум оптическим волокнам посредством двух дополнительно сформированных оптических каналов *5* в моноблоке *1* поступают в оптический контур гироскопа во взаимно обратных направлениях [2].

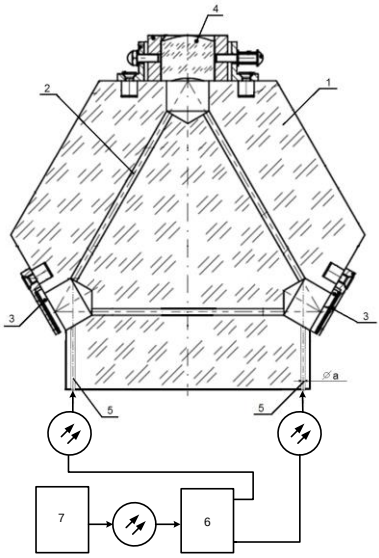


Рис.1. Лазерный гироскоп с волоконно-оптическим разветвителем

Разработанное конструктивно-технологическое решение позволяет снизить температурную нестабильности устройства за счёт симметрии относительно системы съёма информации, повысить эффективность использования лучистой энергии полупроводникового лазера за счёт применения внешнего волоконно-оптического разветвителя с фиксированным коэффициентом деления. Технология изготовления изделия упрощена за счёт применения промышленных комплектующих и органического стекла, что повышает универсальность изделия, снижает стоимость при одновременно высокой надежности и приемлемых технических параметрах.

Список литературы

1. Ус Н.А., Задорожний С.П., Авершин А.А. Применение волоконно-оптического разветвителя в кольцевом моноблочном гироскопе // V Международная научно-практическая конференция «АВИАТОР» Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание, разработки: сб. научн. статей. Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА». 2018. С. 317-319.

2. Ус Н.А., Задорожний С.П., Авершин А.А., Склярова О.Н. Лазерный гироскоп. Патент РФ № 2785441. Заявитель и патентообладатель ФГК ВОУ ВО ВУНЦ ВВС «ВВА» (Воронеж) заявка № 20211120205; заявл. 08.07.2021; опубл. 08.12.2022, Бюл. № 34.

УДК 535(06)+004(06)

Д.Н. МОСКАЛЕВ[1,2], А.А. КОЗЛОВ[1,2], У.О. САЛГАЕВА[2],
В.В. КРИШТОП[1,2,3], А.Б. ВОЛЫНЦЕВ[2]
[1]*Пермская научно-производственная приборостроительная компания*
[2]*Пермский государственный национальный исследовательский университет*
[3]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУАНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ К МОДЕЛИРОВАНИЮ МНОГОМОДОВОГО ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО ДЕЛИТЕЛЯ 2 × 2

Показано сравнение результатов моделирования многомодового интерференционного делителя делителя 2 × 2, которые были получены методом распространяющегося пучка и с помощью полуаналитической модели.

D.N. MOSKALEV[1,2], A.A. KOZLOV[1,2], U.O. SALGAEVA[2],
V.V. KRISHTOP[1,2,3], A.B. VOLYNTSEV[2]
[1]*Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company*
[2]*Perm National Research State University*
[3]*Perm National Research Polytechnic University*

APPLYING A SEMI-ANALYTICAL MODEL TO THE SIMULATION OF A 2 × 2 MULTIMODE INTERFERENCE COUPLER

The results of a study of a 2 × 2 MMI splitter obtained by the beam propagating method and with the semi-analytical model are shown.

Одним из важнейших элементов фотонных интегральных схем является многомодовый интерференционный делители (МИД, Multimode interference coupler, MMI-coupler) [1]. МИД применяется для разделения и суммирования мощности излучения, может быть использован в качестве входных тейперов дифракционных решёток на основе массива волноводов (Arrayed waveguide grating, AWG). Обычно МИД с высокой точностью моделируются методом распространяющегося пучка (МРП, Beam propagation method, BPM) [2]. Также существуют аналитические и полуаналитические модели МИД [3, 4].

Целью настоящей работы является моделирование МИД 2 × 2 с помощью двумерного BPM и с помощью полуаналитической модели, приведённой в статье [4]. Схематическое изображение моделируемого МИД приведено на рис. 1. Параметры МИД были следующие: ширина

многомодовой области D = 9 мкм; длина многомодовой области L = 61,5 мкм; эффективный показатель преломления волноводного слоя 1,67622; эффективный показатель преломления подложки 1,34123; длина тейперов L_t = 5 мкм; смещение волноводов $s_{in} = s_{out}$ = 1,57 мкм; ширина тейперов d = 2 мкм.

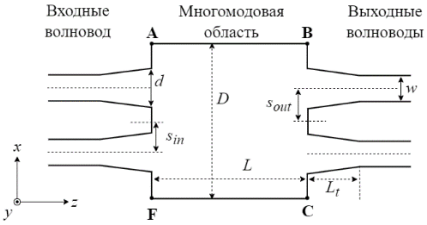


Рис. 1. Схема МИД 2 × 2

Геометрия МИД рассчитывалась для длины волны 1,55 мкм. В BPM размер расчётной области был выбран 80,5 на 24 мкм, шаг сетки дискретизации по осям x и z составил 0,01 мкм. Моделирование с целью определения величины выходной мощности в каждом волноводе проводилось для диапазона длин волн от 1,5 до 1,6 мкм. Результаты моделирования показали совпадение результатов для выбранного диапазона длин волн (относительная ошибка вычисления выходной мощности не превышала 4 %) (рис. 2). Таким образом, разработанная полуаналитическая модель позволяет моделировать МИД с точностью сопоставимой с BPM, и может быть использована для быстрого прототипирования МИД.

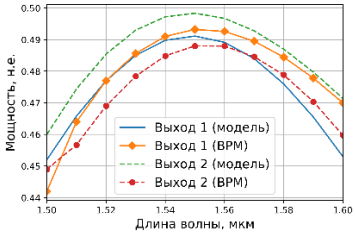


Рис. 2. График зависимости выходной мощности от длины волны

Список литературы

1. Soldano L.B., Pennings E.C.M. // J. Light. Technol. 1995. V. 13. P. 615-627.
2. Bogaerts W., Chrostowski L. // Laser & Photonics Reviews. 2018 V. 12 (4). P. 1700237.
3. Cooney K., Peters F.H. // Optics Express. 2016 V. 24 (20). P. 22481-22515.
4. Moskalev D.N., Kozlov A.A., et al. // Photonics 2023. V. 10 (11). P. 1260.

УДК 535(06)+004(06)

О.М. ВОХНИК[1], А.М. ЗОТОВ[1], П.В. КОРОЛЕНКО[1,2],
Р.Т. КУБАНОВ[1], Н.Н. ПАВЛОВ[1]
[1]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
[2]Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

ФРАКТАЛОПОДОБНЫЕ СВЕТОВЫЕ СТРУКТУРЫ: СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЯ

Приведены результаты исследования пространственных спектров фракталоподобных световых полей, сформированных на основе полиномных динамических аттракторов и мультифрактальных структур. Показано, что для широкого диапазона изначально задаваемых параметров пространственные спектры построенных световых распределений обладают фрактальными признаками. Рассмотрена возможность применения излучения с такими характеристиками в арт-терапии и офтальмологии.

O.M. VOKHNIK[1], A.M. ZOTOV[1], P.V. KOROLENKO[1,2],
R.T. KUBANOV[1], N.N. PAVLOV[1]
[1]Lomonosov Moscow State University
[2]Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

FRACTAL-LIKE LIGHT STRUCTURES: PROPERTIES AND APPLICATIONS

The results of a study of the spatial spectra of fractal-like light fields formed on the basis of multifractal structures, as well as polynomial dynamic attractors, are presented. It is shown that for a wide range of initially specified parameters, the spatial spectra of the constructed light distributions have fractal characteristics. The possibility of using radiation with such characteristics in art-therapy and ophthalmology is considered.

Фрактальные световые структуры стали предметом развернутых исследований. Наличие скейлинга в их пространственных спектрах, непосредственно связанное с присутствием эстетических признаков, позволило с высокой степенью эффективности использовать их в таких областях медицины как арт-терапия и офтальмология [1]. Существует, однако, необходимость в исследовании возможности использования для указанных целей иным образом сформированные световые поля. В данной работе в качестве альтернативы регулярным фракталам рассматриваются структуры, построенные на основе геометрии

полиноминальных аттракторов и мультифрактальных изображений. Изучение их свойств и определило цель проведённых исследований.

Для построения аттракторов использовались уравнения [2]:

$$x_{n+1} = a_0 + a_1 x_n + a_2 x_n^2 + a_3 x_n y_n + a_4 y_n + a_5 y_n^2,$$
$$y_{n+1} = a_6 + a_7 x_n + a_8 x_n^2 + a_9 x_n y_n + a_{10} y_n + a_{11} y_n^2.$$

В зависимости от величины коэффициентов a_i итерационная процедура позволяет строить аттракторы с разной конфигурацией. Один из таких аттракторов (при n = 3000) изображён на рис. 1а. Насыщенность оттенков серого соответствует плотности значащих точек. Распределение пространственных частот p и q показано на рис. 1б. Спектральные максимумы располагаются по окружностям. Отношение их радиусов близко к постоянной величине, равной 3.2.

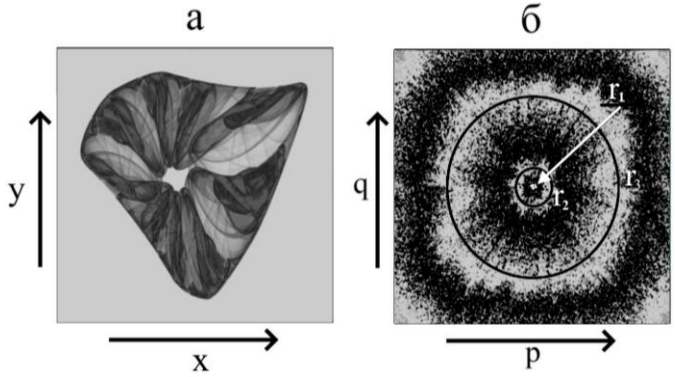


Рис. 1. Структура аттрактора (а) и его спектр (б)

При построении мультифрактальной структуры использовалась модифицированная двумерная функция Вейерштрасса [1], в которой фрактальная размерность считалась зависящей от поперечных координат. Анализ показал, что для широкого диапазона параметров распределение поля также характеризуется скейлингом пространственного спектра.

Таким образом, полученные результаты указывают на возможность расширить типы используемых в медицине тестовых изображений.

Список литературы

1. Вохник О.М., Короленко П.В., et al. // Известия РАН. Сер.физ. 2022. Т. 86 (11). С. 1602.
2. Sprott C. Elegant Fractals. Singapore, 2018.

УДК 535(06)+004(06)

Ю.О. ПРОСОВСКИЙ, Д.Г. ДЕНИСОВ[1], О.Ф. ПРОСОВСКИЙ,
А.Н. ИСАМОВ, В.А. СМОЛЬЯНИНОВ, А.Ю. БУДНЕВ
*Обнинское научно-производственное предприятие «Технология»
им. А.Г. Ромашина, Калужская обл.*
[1]Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

КЛЮЧЕВЫЕ АСПЕКТЫ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

В данной работе рассмотрено оборудование, средства САПР и технические решения, позволяющие получать широкую номенклатуру оптических покрытий. Выделены ключевые аспекты данной отрасли.

Yu.O. PROSOVSKIY, D.G. DENISOV[1], O.F. PROSOVSKIY,
A.N. ISAMOV, V.A. SMOL'YANINOV, A.Yu. BUDNEV
Obninsk Research and Production Enterprise Technologiya, Kaluga Region
[1]Bauman Moscow State Technical University

KEY ASPECTS OF THE TECHNOLOGY FOR PRODUCING MULTILAYER INTERFERENCE OPTICAL COATINGS

In this paper equipment, CAD tools and technical solutions, which allow obtain a wide range of optical coatings are shown. Key aspects of this industry are highlighted.

Процесс получения оптических покрытий очень трудоемкий и требующий, как комплексного подхода, так и глубокого анализа, чтобы получать ту или иную оптическую конструкцию, удовлетворяющую поставленной задаче. Условно, технологию получения оптических покрытий можно разделить на три основных компонента (рис. 1): 1) расчёт конструкции оптического покрытия и оптических констант средствами САПР, 2) контроль оптического покрытия в процессе нанесения и 3) способы минимизации погрешностей для обеспечения максимальной воспроизводимости от процесса к процессу.

Расчёт оптических констант подложки и плёнкообразующих материалов является первым этапом для получения качественной оптической конструкции. Для расчёта многослойных интерференционных структур активно используются средства САПР. При расчёте оптических покрытий важно руководствоваться не только техническим заданием, но и возможностью практического применения оптического покрытия.

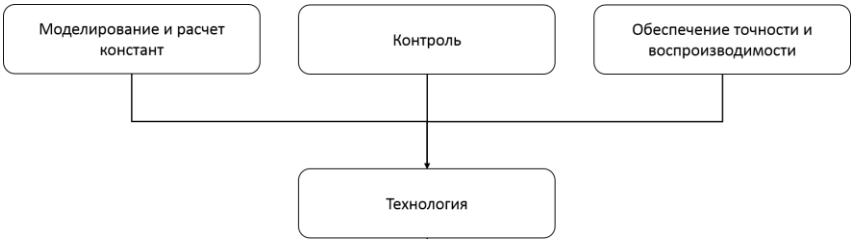


Рис. 1. Технология получения многослойных интерференционных покрытий

После корректного расчёта оптических констант и оптической конструкции важно получить его на производстве. Огромную роль в этом играет система контроля толщины оптических покрытий [1].

Не менее важным компонентом является также воспроизводимость покрытий от процесса к процессу. Чем больше слоёв необходимо напылить – тем сложнее обеспечить заданную точность, даже с учётом возможной реоптимизации покрытия. Поэтому, для напыления интерференционных оптических покрытий с числом слоёв больше 50, нами была разработана конструкция прибора – чейнджер, позволяющая разбить общую оптическую конструкцию на несколько, с меньшим числом слоёв [2].

Применение всех факторов технологии получения многослойных оптических покрытий позволяет получать сложные, воспроизводимые от процесса к процессу интерференционные оптические покрытия.

Список литературы

1. Просовский О.Ф., Буднев А.Ю., Просовский Ю.О., Денисов Д.Г., Барышников Н,В. // Светотехника 2020. № 4. С. 8796-805.

2. Prosovskii Y.O., Prosovskii O.F., Denisov D.G., Metleva A.P., Golubeva N.A. // Proc. SPIE. 2021. V. 11783. P. 117830O.

УДК 535(06)+004(06)

О.А. САПЦОВА, А.А. КОРОННОВ, В.О. ЯКОВЛЕВ, В.С. ПОПОВ
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ФОТОСЕНСОРОВ В СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ 3 - 5 мкм

Разработана и создана измерительная установка для исследования фоточувствительности и быстродействия фотосенсоров в областях спектра 3 - 5 мкм. Установка позволяет засвечивать образцы сфокусированным пучком излучения диаметром около 200 мкм, а также обеспечивает минимальную длительность импульса засветки 300 нс. Были проведены измерения фоточувствительности и быстродействия фоторезисторов на основе коллоидных квантовых точек теллурида ртути и селенида ртути при засветке излучением от набора светодиодов на длины волн 3.4, 3.8 и 4.2 мкм.

O.A. SAPTSOVA, A.A. KORONNOV, V.O. YAKOVLEV, V.S. POPOV
Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

MEASURING EQUIPMENT FOR INVESTIGATION PHOTOSENSITIVITY AND RESPONSE OF PHOTOSENSORS IN THE SPECTRAL RANGE 3 - 5 MICRONS

A measuring equipment has been developed and created for investigation photosensitivity and response of photosensors in the spectral range 3 - 5 microns. The installation allows to illuminate samples with a focused beam of radiation with a diameter of about 200 microns. The equipment provides a minimum illumination pulse duration of 300 ns. The photosensitivity and response of light dependent resistors based on colloidal quantum dots of mercury telluride and mercury selenide were measured when illuminated by radiation from a set of LEDs at wavelengths of 3.4, 3.8 and 4.2 μm.

Фоточувствительность и быстродействие являются одними из основных и наиболее важных фотоэлектрических параметров полупроводниковых фотодетекторов, которые определяют область применения приборов и говорят о качестве и свойствах материала [1].

Разработанная установка позволяет проводить измерения времени отклика исследуемых образцов на импульсную засветку инфракрасным (ИК) изучением, а также даёт возможность расчёта фоточувствительности образцов.

Существует несколько подходов к созданию установок для измерения требуемых фотоэлектрических характеристик. В качестве ИК-источника излучения возможно использование абсолютно чёрного тела, светодиода (СД) или лазера [2, 3]. Преимущества применения СД заключаются в возможности достижения засветки исследуемых образцов короткими импульсами, в низкой стоимости и в относительно небольших размерах. В данной работе применяется набор СД с интерференционными фильтрами (ИФ) (СД LED34TO8TEC с ИФ INBP3295, СД LED38TO8TEC с ИФ INBP3900, СД LED42TO8TEC с ИФ INBP4260).

Установка состоит из нескольких отдельных блоков, меняя которые можно проводить измерения на разных длинах волн и исследовать различные образцы.

Излучение СД проходит через выпукло-плоскую линзу и фокусируется на поверхности исследуемых фотосенсоров [4]. Фотодиод PD42 WB TO8TEC выступает в качестве опорного приёмника, а также используется для отладки работы установки. Излучение преобразуется в электрический сигнал и подаётся на вход осциллографа. Для измерения параметров исследуемых образцов была выбрана мостовая схема измерения сопротивления фоторезисторов (ФР). Предполагается проведение измерений сопротивления ФР в темновом режиме и при внешней светодиодной засветке. Значение фоточувствительности рассчитывается как отношение изменения сопротивления ФР к значению мощности засветки, которая контролируется при помощи фотодиода.

Для проверки работы установки были исследованы фоточувствительность и быстродействие ФР на основе коллоидных квантовых точек HgTe и HgSe. Разработанная установка обеспечивает высокую точность измерения фотоэлектрических характеристик в среднем ИК-диапазоне. Конструкция установки технологична, предусмотрены: оптимальные затраты при сборке, удобство эксплуатации и ремонтопригодность.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-03-2023-106 от 13.01.2023 (проект № FSMG-2022-0034).

Список литературы

1. Пономаренко В.П. Квантовая фотосенсорика. 2018.
2. Геда Н.Ф. Измерение параметров приборов оптоэлектроники. 1981.
3. Ермаков О.Н. Прикладная оптоэлектроника. 2004.
4. Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И. Теория оптических систем. 1992.

УДК 535(06)+004(06)

В.А. СМОЛЬЯНИНОВ, Ю.О. ПРОСОВСКИЙ, О.Ф. ПРОСОВСКИЙ, Д.Н. ПЕТРАЧКОВ, А.Н. ИСАМОВ, А.Ю. БУДНЕВ
Обнинское научно-производственное предприятие «Технология» им. А.Г. Ромашина, Калужская обл.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ

В данной работе проведено исследование спектральных характеристик алюминиевых плёнок, полученных при различных условиях.

V.A. SMOL'YANINOV, Yu.O. PROSOVSKIY, O.F. PROSOVSKIY, D.N. PETRACHKOV, A.N. ISAMOV, A.Yu. BUDNEV
Obninsk Research and Production Enterprise Technologiya, Kaluga Region

COMPARATIVE ANALYSIS OF ALUMINUM COATINGS OBTAINED BY DIFFERENT CONDITIONS

In this paper the spectral characteristics of aluminum films obtained by different conditions are discussed.

Плёнки алюминия широко применяются в вакуумном напылении. Основное применение тонких плёнок заключается в изготовлении отражающих покрытий, полупроводниковых приборов, электродов, контактных площадок [1]. Основными преимуществами алюминия являются высокая отражательная способность и устойчивость к коррозии, хорошая электро- и теплопроводность, экологичность и эстетичность поверхности, пластичность и пригодность к различным видам обработки [2]. Однако, качество покрытия напрямую связано с методом нанесения тонких плёнок на подложку. Алюминий – материал крайне чувствительный к малейшим изменениям условий нанесения, поэтому целью данной работы являлось проведение исследования спектральных характеристик алюминиевых плёнок, полученных различными методами, с целью определения наиболее подходящего. Данный анализ позволит отработать технологию, позволяющую получать высококачественные покрытия на основе тонких плёнок алюминия.

Исследование проводилось на предприятии АО ОНПП «Технология им. А.Г. Ромашина» в Лаборатории оптических покрытий с использованием модернизированной вакуумной установки ВАК-760. Эксперимент состоял из нескольких процессов нанесения оптических покрытий электронно-лучевым методом при различных условиях. Комбинировались следующие условия: температура подложки в камере (20 или 250 °С), наличие ионного ассистирования или его отсутствие, скорость испарения алюминия из тигля. Покрытия наносились одной и той же толщины (200 нм) при одинаковом давлении.

В результате эксперимента были получены образцы с алюминиевым покрытием, спектральные зависимости отражения которых изображены на рис. 1.

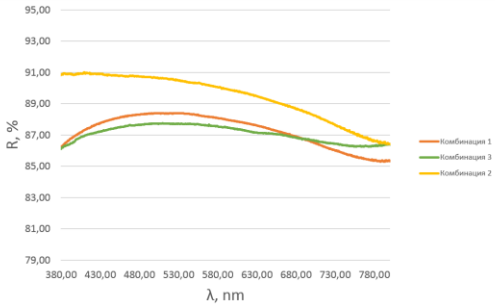


Рис. 1. Спектральные зависимости отражения алюминиевых покрытий, полученных разными методами

Список литературы:

1. Степанов А.А., Смирнов А.Г. Структура, морфология и электрофизические свойства прозрачных наносетчатых плёнок алюминия // Доклады БГУИР. 2012. № 5 (67).

2. Канунникова О.М., Кожевников В.И., Гончаров О.Ю. Состав и строение тонких алюминиевых плёнок на силикатных стёклах // Химическая физика и мезоскопия. 2008. № 1.

УДК 535(06)+004(06)

Д.Г. ДЕНИСОВ
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

КОГЕРЕНТНЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ РАССЕЯННОГО ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

В работе представлены результаты математического моделирования модифицированного метод дифференциального рассеяния и метода на основе диагностики эллипсометрических параметров лазерного излучения, основанные на приближениях малых возмущений амплитуд отражённой электромагнитной волны в оптическом спектральном диапазоне от поверхности фазового экрана и приближениях Кирхгофа.

D.G. DENISOV
Bauman Moscow State Technical University

COHERENT METHODS OF CONTROL OF SCATTERED OPTICAL RADIATION FOR MEASURING THE QUALITY PARAMETERS OF THE SURFACES OF OPTICAL PARTS

The paper presents the results of mathematical modeling of a modified differential scattering method and a method based on diagnostics of ellipsometric parameters of laser radiation based on approximations of small perturbations of the amplitudes of the reflected electromagnetic wave in the optical spectral range from the surface of the phase screen and Kirchhoff approximations.

Задача исследования показателей качества структуры поверхностей оптических и лазерных деталей, является важной и актуальной в оптических технологиях, поскольку оперативный высокоточный межоперационный контроль позволяет обеспечить высокие эксплуатационные и технологические показатели. Стоит отметить, что для обеспечения высоких технологических показателей качества различных оптических и лазерных деталей нового поколения, необходим не только современный подход к методам и средствам обработки деталей, но и реализация перспективных высокоточных бесконтактных методов диагностики. Особое внимание в единой технологической цепочке занимают стадии от средне шлифовки до глубокой полировки, когда статистические параметры изготавливаемых профилей достигают от

единиц и долей микрон до ангстремных уровней. В этом случае важно корректно применять приближения теории дифракции: от приближений Кирхгофа до метода малых возмущений [1 - 3]. В этом контексте рассмотрим и проработаем методологию и математический аппарат двух методов: метода контроля эллипсометрических характеристик для дифрагированной зеркальной компоненты и слабо рассеянного излучения в окрестности зеркальной компоненты [3], а так же модифицированного метода дифференциального рассеяния. Последнее приближение и метод основанный на регистрации индикатрисы рассеянного лазерного излучения характерен для диагностики высотных статистических параметров субнанометрового уровня и на сегодняшний день применяются различные классы оптико-электронных приборов и систем, основанные на данном идеологии. Наибольший интерес в задачах высокоточного аттестационного контроля представляют такие перспективные приборы и системы, как: динамические интерферометры и интерферометры белого света, а так же приборы, позволяющие оценивать среднеквадратическое значение поверхностных неоднородностей по данным анализа индикатрисы рассеянного лазерного излучения. В мировой практике методы, основанные на анализе индикатрис рассеянного лазерного излучения классифицируются следующим образом [1, 2]: методы полного интегрального рассеяния (TIS – Total Integrated Scattering), методы определения функции распределения коэффициента отражения по двум угловым координатам (метод определения характеристики BRDF – Bidirectional Reflectance Distribution Function), методы дифференциального рассеяния (ARS- – Angle-Resolved Scattering).

В рамках приближения дифракции Кирхгофа в работе предложен и методически и математически реализован метод диагностики эллипсометрических параметров дифрагированного лазерного излучения [3], позволяющий проводить измерение как качества оптических поверхностей, так и поверхностных плёночных загрязнений и осаждений, царапин и дефектов в виде точек.

Список литературы

1. Denisov D.G. // Applied physics. 2022. No. 1. P. 89-96.
2. Azarova V.V., Dmitriev V.G., et al. // Quantum Electronics. 2000. V. 30. No. 4. P. 360-364.
3. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. М.: Мир, 1981.

УДК 535(06)+004(06)

А.С. САРГСЯН, В.А. ПАРФЕНОВ[1]
Национальный политехнический университет Армении, Ереван
[1]*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)*

РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ ЮСТИРОВКИ РАДИООПТИЧЕСКОГО ТЕЛЕСКОПА РОТ-54/2.6

Антенна радиооптического телескопа РОТ-54/2.6 на сегодняшний день является самой крупной в мире двухзеркальной сферической антенной. Для планируемой расконсервации, восстановления и перезапуска антенны необходима реализация ряда важных мероприятий, в том числе: воссоздание рабочих чертежей, предварительная и комплексная юстировка зеркал антенны и пр. Концепция юстировки предполагает использование традиционных методов лазерной дальнометрии и технологии лазерного 3D-сканирования.

A.S. SARGSYAN, V.A. PARFENOV[1]
National Polytechnic University of Armenia, Yerevan
[1]*Saint-Petersburg State Electrotechnical University «LETI»*

DEVELOPMENT OF THE CONCEPT OF ADJUSTMENT OF THE MAIN REFLECTOR OF THE RADIO-TELESCOPE

The only Radio Optical Telescope in the world ROT-54/2.6 located in Armenia is the first largest double-reflector spherical antenna now. The telescope has been mothballed for many years, but now work is beginning on its deconservation. It is necessary to realize a number of important and complicated works including revitalizing of all design drawings and adjustment of the antenna reflectors. The concept of the adjustment will be based on the traditional methods of the laser measurements as well as 3D laser scanning technology.

Одиночные зеркальные антенны, используемые в качестве радиотелескопов, обычно имеют очень большие размеры, а их зеркальная поверхность собирается из металлических панелей, опирающихся на специальные жесткие опорные элементы. Уникальной особенностью телескопа РОТ-54/2.6 (рис. 1), расположенного в Армении на горе Арагац, является то, что он является радиооптическим телескопом, а его главное зеркало (ГЗ) является самой крупной в мире двухзеркальной сферической антенной [1]. Отражающая поверхность ГЗ представляет собой полусферу с диаметром 54 м. Она собрана из панелей сферического профиля из сплава алюминия с цинком (их общее число – около 4000). Вторичное

корректирующее зеркало имеет профиль кривой второго порядка. Отражающая поверхность малого зеркала собрана из 170 титановых панелей. Диаметр его апертуры составляет 5688 мм.

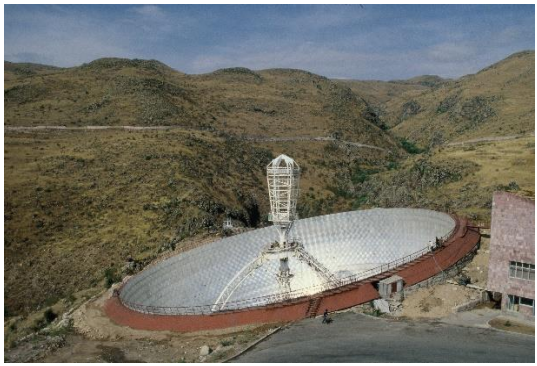


Рис. 1. Радиооптический телескоп РОТ-54/2.6 (общий вид)

Телескоп РОТ-54/2.6 был построен в конце 1980-х годов. В ближайшей перспективе должны начаться работы по его расконсервации, ремонту и перезапуску. Одним из самых сложных этапов этой работы является комплексная юстировка антенны, которая будет включать определение центра полусферической чаши антенны и проверку совмещения центра вращения системы подвески малого зеркала с центром сферы с целью обеспечения в дальнейшем возможности фиксации геометрической оси зеркала [2]. Решение перечисленных задач может быть реализовано при использовании оптических устройств, в том числе лазерных дальномеров. Авторы изучают возможность применения технологии лазерного 3D-сканирования. Предварительные оценки показывают, что использование 3D-сканирования может обеспечить соблюдение необходимой точности, принятой при полномасштабной юстировке больших зеркальных антенн с гомологичной зеркальной системой для работы в сантиметровом и миллиметровом диапазонах электромагнитных волн Работы по сканированию предполагается выполнить при помощи лазерного 3D-сканера времяпролётного типа.

Список литературы

1. Herouni P.M. The first radio-optical telescope // Trans. of Sixth International Conference on Antennas and Propagation ICAP89/IEEE-URSI. 1989. V. 1. P. 540-546.

2. Саргсян А.С. Методика предварительного этапа юстировочных работ по расконсервации антенны РОТ-54/2.6 // Радиотехника. 2023. Т. 87. № 2. С. 172-177.

УДК 535(06)+004(06)

Е.Ю. ЛЕТОВА, Т.В. ИВАНОВА, Д.С. ЗАВГОРОДНИЙ[1]
Университет ИТМО, Санкт-Петербург
[1]ОАО ЛОМО, Санкт-Петербург

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ТЕСТ-ОБЪЕКТОВ ДЛЯ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В работе рассмотрены различные параметры предварительной обработки изображений и их влияние на точность вычисления характеристик качества оптических систем. Предложен метод автоматизированной настройки опций фильтрации изображения, а также расчёта интенсивности фонового сигнала и удаления паразитной засветки в зависимости от конструкции схемы контроля, в том числе от типа и размера тест-объекта. Выведены общие рекомендации для подбора параметров предварительной обработки и оценена погрешность полученных результатов.

E.Yu. LETOVA, T.V. IVANOVA[1], D.S. ZAVGORODNIJ[1]
[1]ITMO University, Saint-Petersburg
[2]OJSC LOMO, Saint-Petersburg

AUTOMATION OF TEST-OBJECTS IMAGES PREPROCESSING FOR SOFTWARE-HARDWARE COMPLEX FOR OPTICAL SYSTEMS QUALITY CONTROL

The paper discusses various image preprocessing parameters and their impact on the accuracy of calculating the optical systems quality characteristics. The method for automated adjustment of different settings that drive such processes as image filtering, background signal intensity calculation and extraneous light removal, depending on the control scheme design, including the type and size of test-objects, is proposed. General recommendations for the selection of preprocessing parameters are derived and the error of the obtained results is assessed.

В настоящее время одной из важнейших задач, возникающих в процессе изготовления оптических систем, является контроль их качества, который в свою очередь представляет собой актуальную научную проблему. Методы, основанные на регистрации изображений тест-объектов и дальнейшем анализе изображений, как правило, требуют предварительной обработки полученных данных для точного вычисления характеристик качества, таких как концентрация энергии и функция

передачи модуляции. При этом для правильной оценки качества контролируемой системы необходимо не только учитывать искажения масштаба и интенсивности изображения тест-объекта, вносимые компонентами схемы контроля, но и решать научную задачу поиска центра пятна рассеяния сложной формы с заданной точностью [1].

Целью работы является выявление критериев подбора параметров предварительной обработки зарегистрированных изображений и последующая автоматизация подготовки входных данных перед выполнением вычислений. Разработка критериев выполняется на основе известных теоретических принципов и анализа результатов предварительной обработки пятен рассеяния, выполненной оператором разработанной программы. Данный способ позволяет соотнести характеристики схемы контроля и зарегистрированного изображения с параметрами предварительной обработки, при которых погрешность вычисления результирующих функций при их сравнении с референтными графиками является минимальной. Так размер выборки функции рассеяния устанавливается автоматически в зависимости от геометрического размера пятна рассеяния, чтобы отношение площади, занимаемой изображением точки, к общей площади кадра оставалось постоянным [2].

Рекомендуемый порядок настройки параметров начинается с подбора размера центральной области, определяющего, какую часть от полуширины выборки по краям использовать при вычислении фона и количества итераций вычитания полученного значения. Дальнейшая последовательность подбора параметров зависит от типа тест-объекта. Для точечного тест-объекта на следующих шагах происходит подбор параметров фильтрации и размера ненулевой области. Для линейного тест-объекта следующим этапом является подбор порогового значения интенсивности для суммирования функции рассеяния линии (ФРЛ) [3].

Таким образом, в результате работы выведены критерии, позволяющие автоматизировать предварительную обработку зарегистрированных ФРЛ с установленной погрешностью. Также разработаны рекомендации для наиболее эффективной подготовки изображений точечных объектов к последующему анализу.

Список литературы

1. Ivanova T.V., Letova E.Yu., et al. // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2021. V. 21. P. 334-341.

2. Letova E.Yu. // Almanac of Research Papers of Young Scientists of ITMO University. 2023.

3. Letova E.Yu. // XI Congress of Young Scientists. Collection of scientific papers. 2022. V. 1. P. 637-640.

В.В. ШИПКО[1,2], В.Э. ПОЖАР[2], А.С. МАЧИХИН[2,3]
[1]Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, Воронеж
[2]Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва
[3]Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

МЕТОД КОМПЛЕКСНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ СПЕКТРАЛЬНОГО, ПРОСТРАНСТВЕННОГО И РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО РАЗРЕШЕНИЙ В ГИПЕРСПЕКТАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ

Предложен и обоснован метод управление спектральным, пространственным и радиометрическим разрешением гиперспектральной системы, который открывает возможность проводить гиперспектральный мониторинг объектов при ограниченных вычислительных ресурсах и пропускной способности канала передачи видеоданных.

V.V. SHIPKO[1,2], V.E. POZHAR[2], A.S. MACHIKHIN[2,3]
[1]Air Forces Academy named after Prof. N.E. Zhukovskiy and Yu.A. Gagarin, Voronezh
[2]Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow
[3]National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

THE METHOD OF COMPLEX CONTROL OF SPECTRAL, SPATIAL AND RADIOMETRIC PERMITS IN HYPERSPECTAL MONITORING SYSTEM FOR GROUND OBJECTS

A method for controlling the spectral, spatial and radiometric resolution of a hyperspectral system is proposed and justified, which opens up the possibility of hyperspectral monitoring of objects with limited computing resources and bandwidth of the video data transmission channel.

При практической реализации гиперспектрального мониторинга необходимо иметь достаточные вычислительные ресурсы для оперативной автоматической бортовой обработки большого объёма регистрируемых данных либо высокоскоростную линию передачи гиперспектральных изображений (ГСИ) на наземные автоматизированные пункты обработки. Передавать и обрабатывать ГСИ с высоким пространственным, спектральным и радиометрическим разрешением в реальном масштабе времени в настоящий момент представляется затруднительным. Поэтому

для решения задачи анализа и обработки ГСИ в реальном масштабе времени перспективным является построение адаптивной гиперспектральной системы, способной изменять количество и ширину спектральных каналов, их расположение и порядок опроса, а также пространственное разрешение и разрядность квантования сигналов в зависимости от решаемой задачи и технических ограничений.

Для реализации режима выборочной спектральной адресации в работе предлагается использовать перестраиваемый акустооптический (АО) фильтр [1, 2], в которых также возможен режим управления шириной спектрального окна и получения спектральных изображений, соответствующих сразу нескольким длинам волн. Акустооптические фильтры (АОФ) основаны на брэгговской дифракции света на динамических решётках, возбуждаемых акустической ультразвуковой волной, и осуществляют спектральную фильтрацию световых пучков без существенных искажений переносимых ими изображений. Основными преимуществами АОФ являются программное управление с быстрой перестройкой по спектру, отсутствие подвижных механических элементов, малые масса и габариты, достаточно высокое качество получаемых изображений и высокое спектральное разрешение.

Управление разрядностью квантования сигналов яркости изображений (радиометрическим разрешением) реализовано на основе электронной схемы 12-разрядного АЦП с управляемым уровнем квантования преобразуемого входного сигнала путём изменения разрядности (длины) выходного кода АЦП. Управление пространственным разрешением формируемых ГСИ осуществлено на основе современных технологий КМОП-матриц, обладающих функцией изменения режимов работы фотоприёмника и позволяющих переключать разрешение за счёт прореживания или объединения соседних пикселов в один (биннинг).

Результаты экспериментальных и численных исследований показали [3] возможность достаточно стабильной эффективности классификации гиперспектральных изображений при снижении их спектрального, пространственного и радиометрического разрешений.

Список литературы

1. Пожар В.Э., Мачихин А.С., Гапонов М.И. и др. Гиперспектрометр на основе перестраиваемых акустооптических фильтров для БПЛА // Светотехника. 2018. № 4. С. 47-50.

2. Мазур М.М., Пожар В.Э. Спектрометры на акустооптических фильтрах // Измерительная техника. 2015. № 9. С. 29-33.

3. Шипко В.В. Пожар В.Э., Мачихин А.С. и др. Разработка малогабаритной гиперспектальной системы с управляемым спектральным, пространственным и радиометрическим разрешением // Светотехника. 2022. № 4. С. 71-77.

УДК 535(06)+004(06)

С.В. БОРИТКО
Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕПОСРЕДСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПРОИЗВОДНЫХ ОПТИЧЕСКОГО СПЕКТРА В СПЕКТРОМЕТРИИ

В работе обоснована возможность непосредственной регистрации производных оптического спектра при исследовании многокомпонентных образцов, что исключает необходимость использовать математическую постобработку зарегистрированных спектров. Данный факт был экспериментально подтверждён на макете спектрометра, созданного на основе квазиколлинеарной акустооптической ячейки, использующей резкое периодическое переключение фазы управляющего сигнала.

S.V. BORITKO
Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of RAS, Moscow

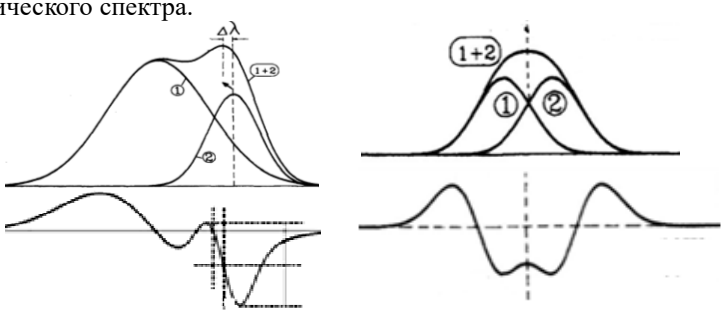
USE OF DIRACT RECORDING OF DERIVAITIVES OF THE OPTICAL SPECTRUM IN SPECTROMETRY

The work substantiates the possibility of directly recording derivatives of the optical spectrum when studying multicomponent samples, which eliminates the need to use mathematical post-processing of the recorded spectra. This fact was experimentally confirmed on a spectrometer prototype created on the basis of a quasi-collinear acousto-optic cell using sharp periodic switching of the control signal phase.

Перед спектрометрией многокомпонентных субстанций стоят две основные задачи: точное определение частоты спектральных составляющих в перекрывающихся спектрах отдельных компонент и насколько близко расположенные спектральные составляющие можно достоверно различать. При этом в случае многокомпонентных образцах спектры от разных компонент могут перекрываться. В этом случае возникает ситуация, представленная на рис. 1 и встаёт вопрос: точно ли определены положения спектральных особенностей (*а*), зафиксированная спектральная линия одна или две близко расположенные (*б*).

Ответ на эти вопросы даёт аналитическая химия, использующая для исследования "мутных жидкостей" (многокомпонентных субстанций с сильным затуханием оптических сигналов) метода производной спектрофотометрии. Регистрируется спектральная зависимость

оптической плотности субстанции, затем характеристика математически сглаживается с целью устранения шумовой компоненты, после чего дифференцируется нужное количество раз (рис. 1). Однако, математическая постобработка может вносить искажения в получаемую информацию. Встаёт задача непосредственной регистрации производных оптического спектра.



а *б*

Рис. 1. Спектральные ситуации, складывающие при исследовании многокомпонентных образцов: наложение спектральных линий (*а*); перекрывающиеся близко расположенные спектральные линии (*б*)

В НТЦ Уникального приборостроения РАН на базе квазиколлинеарной акустооптической ячейки был разработан макет спектрометра, регистрирующий производные оптического сигнала. В основе его работы лежит дифракция оптического сигнала на акустической волне с резким периодическом переключении фазы. Созданная электроника обеспечивает стабильное синхронное фазовое детектирование дифрагированного сигнала. На рис. 2 представлена часть спектра неоновой лампы, зарегистрированная макетом. Чётко виден как сам спектр, так и его первая и вторая производные.



Рис. 2. Часть спектра, зарегистрированная созданным макетом

УДК 535(06)+004(06)

В.М. КОТОВ, С.В. АВЕРИН
Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА, РАБОТАЮЩЕГО ПРИ НИЗКИХ ЧАСТОТАХ ЗВУКА

Рассмотрено двумерное выделение контура изображения с использованием акустооптического (АО) фильтра, работающего при низких акустических частотах. Получены передаточные функции нулевого и первого порядков дифракции фильтра, работающего в тангенциальной геометрии, при низких акустических частотах. Показано, что при частоте ниже некоторой граничной частоты невозможно выполнять двумерную обработку изображений. Основные результаты подтверждены экспериментально.

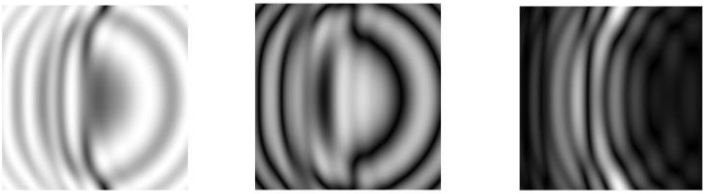
V.M. KOTOV, S.V. AVERIN
Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS

PECULIARITIES OF THE TRANSFER FUNCTIONS OF AN ACOUSTO-OPTIC FILTER OPERATING AT LOW ACOUSTIC FREQENCIES

Two-dimensional image edge enhancement using an acousto-optical (AO) filter operating at low acoustic frequencies is considered. The transfer functions of the zero and first orders of diffraction of a filter operating in tangential geometry at low acoustic frequencies are obtained. It is shown that at frequencies below a certain cut-off frequency it is impossible to perform two-dimensional image processing. The main results were confirmed experimentally.

Акустооптические (АО) пространственные фильтры широко используются для обработки двумерных изображений. Наиболее известный вариант фильтров основан на использовании тангенциальной геометрии брэгговской дифракции [1], характеризующейся осесимметричным распределением передаточных функций, что наиболее гармонично соответствует задаче обработки изображений по двум координатам. Для уменьшения предельного разрешения фильтра необходимо понижать частоту звука [2]. Однако это сопровождается значительными искажениями передаточных функций, особенно в случаях применения гиротропного кристалла TeO_2 в качестве АО-материала

фильтра. К тому же с понижением частоты звука начинает формироваться более высокие дифракционные порядки. На рис. 1 представлены передаточные функции нулевого (*а*), первого (*б*) и второго (*в*) дифракционных порядков, формируемые в TeO_2 при использовании его в тангенциальной геометрии дифракции.



а *б* *в*

Рис. 1. Передаточные функции нулевого (*а*), первого (*б*) и второго (*в*) дифракционных порядков

Полагалось, что изображение переносится на длине волны света 0.63 мкм, частота поперечного звука 35 МГц, мощность звука 50 мВт. Видно, что передаточные функции являются неосесимметричными, что существенно влияет на характеристики обрабатываемых изображений. С увеличением частоты звука второй дифракционный порядок исчезает, а передаточные функции нулевого и первого порядков становятся осесимметричными в полном соответствии с результатами [1].

Работа выполнена в рамках Государственного Задания ИРЭ РАН.

Список литературы

1. Balakshy V.I., Voloshinov V.B., Babkina T.M., Kostyuk D.E. // J. Mod. Opt. 2005. V. 52. No. 1. P. 1-20.

2. Балакший В.И. // Радиотехника и электроника. 1984. № 8. С. 1610-1616.

УДК 535(06)+004(06)

А.И. КАШАПОВ[1,2], Е.А. БЕЗУС[1,2], Д.А. БЫКОВ[1,2],
Н.В. ГОЛОВАСТИКОВ[1,2], Л.Л. ДОСКОЛОВИЧ[1,2]
[1]Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара
[2]Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЛОИСТЫХ СТРУКТУР ДЛЯ ОПТИЧЕСКОГО ВЫДЕЛЕНИЯ КОНТУРОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В работе рассмотрены металлодиэлектрические структуры, состоящие из чередующихся плоскопараллельных металлических и диэлектрических слоёв. Показано, что при отражении от рассматриваемой структуры происходит преобразование профиля падающего пучка, соответствующее вычислению взвешенной суммы вторых производных по пространственным координатам. Исследована возможность применения таких структур для оптического выделения контуров изображений, соответствующих профилю падающего пучка.

A.I. KASHAPOV[1,2], E.A. BEZUS[1,2], D.A. BYKOV[1,2],
N.V. GOLOVASTIKOV[1,2], L.L. DOSKOLOVICH[1,2]
[1]Image Processing Systems Institute – Branch of the Federal Scientific Research Centre "Crystallography and Photonics" of the RAS, Samara
[2]Samara National Research University

APPLICATION OF METAL-DIELECTRIC LAYERED STRUCTURES FOR OPTICAL IMAGE EDGE DETECTION

We consider metal-dielectric structures consisting of several homogeneous metal and dielectric layers. We show that the transformation of the beam profile in reflection corresponds to the computation of the weighted sum of second derivatives with respect to the spatial coordinates. We investigate the application of such structures for optical edge detection of images corresponding to the incident beam profile.

В настоящее время актуальной задачей науки и техники является поиск решений для повышения быстродействия систем передачи и обработки информации. Структуры фотоники являются перспективными для применения в задачах обработки информации, так как обеспечивают высокую производительность и низкое энергопотребление по сравнению с цифровыми методами [1, 2].

Одной из областей, в которых могут найти применение структуры фотоники, является оптическая обработка изображений, одной из базовых задач которой является выделение контуров. В настоящей работе рассмотрена простая слоистая структура для решения указанной задачи. Геометрия структуры представлена на рис. 1 [3]. Материалы и толщины слоёв структуры (рис. 1) были выбраны специальным образом с использованием оптимизационного подхода, чтобы обеспечить требуемые оптические свойства [3], а именно, возможность вычисления оператора Лапласа от профиля падающего пучка, который часто используется для выделения контуров. В качестве примера применения исследуемой структуры для оптического выделения контуров был рассмотрен падающий пучок с профилем в виде изображения области глаза (рис. 2, левый нижний угол). Для оценки качества выполнения операции оптического выделения контуров исследуемой структурой было рассчитано нормированное СКО профиля отражённого пучка (рис. 2) от аналитически вычисленного оператора Лапласа, составившее менее 1 %.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание Самарскому университету (лаборатория «Фотоника для умного дома и умного города», проект FSSS-2024-0016)).

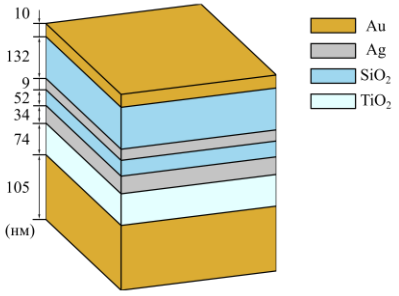


Рис. 1. Геометрия исследуемой слоистой структуры

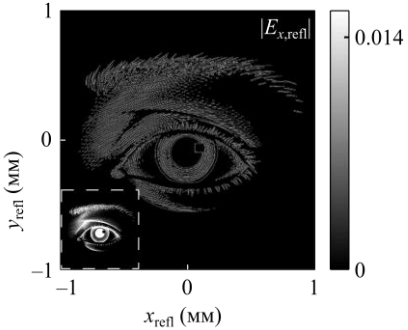


Рис. 2. Рассчитанный профиль отражённого пучка, демонстрирующий выделение контуров (падающий пучок показан в левом нижнем углу)

Список литературы

1. Silva A., Monticone F., et. al. // Science. 2014. V. 343. P. 161.
2. Zhou Y., Zheng H., et. al. // Nat. Photonics. 2020. V. 14. P. 316.
3. Doskolovich L.L., Kashapov A.I., et. al. // Opt. Express. 2023. V. 31 (10). P. 17050.

УДК 535(06)+004(06)

К.Н. БЕЛОВ[1], Н.Д. КУНДИКОВА[1,2]
[1]Южно-Уральский государственный университет, Челябинск
[2]Институт электрофизики УРО РАН, Екатеринбург

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ФУРЬЕ-ОБРАЗОВ КАК МЕТОД ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В ПРОЗРАЧНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Предложен метод, основанный на фурье-оптике, позволяющий экспериментально получать контрастные изображения дефектов в прозрачных материалах. Приведено рассчитанное изображение дефектного прозрачного объекта, полученного новым методом.

K.N. BELOV[1], N.D. KUNDIKOVA[1,2]
[1]South Ural State University, Chelyabinsk
[2]Institute of Electrophysics of Ural Branch of the RAS, Yekaterinburg

SPATIAL FILTERING OF FOURIER IMAGES AS A METHOD OF DEFECT DETECTION IN TRANSPARENT MATERIALS

We propose a method based on Fourier optics that allows us to experimentally obtain contrasting images of defects in transparent materials. We demonstrate a calculated image of a defective transparent object obtained by a new method.

В работе предложен метод, позволяющий экспериментально получать контрастные изображения дефектов в прозрачных материалах с помощью пространственной фильтрации фурье-образа прозрачного объекта. Совокупность пространственных частот (множество всех направлений) излучения, прошедшего через данный объект, представляется фурье-образом прозрачного объекта. Известно, что положительная линза является объектом, выполняющим пространственное фурье-преобразование. Фурье-спектр излучения формируется в фокальной плоскости положительной линзы. При внесении в эту плоскость оптического транспаранта, который перекрывает только основную гармонику фурье-спектра, образуется пространственно-модулированный фурье-образ прозрачного объекта. Восстановленное изображение объекта по данному фурье-образу не содержит засветки основного излучения, что позволяет получить контрастное изображение присутствующих дефектов и оптических неоднородностей в прозрачном материале.

В качестве примера приведены результаты компьютерной обработки фурье-образа оптического изображения дефектного прозрачного

материала в виде лазерной 3D-гравировки змейки в стекле (рис. 1 - 4). На рассчитанном фурье-спектре (рис. 2), полученном с помощью программного фурье-преобразования исходного изображения объекта (рис. 1), вырезана центральная область (рис. 3), соответствующая основной гармонике (то есть засветке) прошедшего через образец излучения. С помощью обратного фурье-преобразования получено изображение объекта без засветки, на котором проявляются наличествующие дефекты в виде образа змеи.

Таким образом, предложенный метод может использоваться для выявления дефектов и неоднородностей в прозрачных материалах.

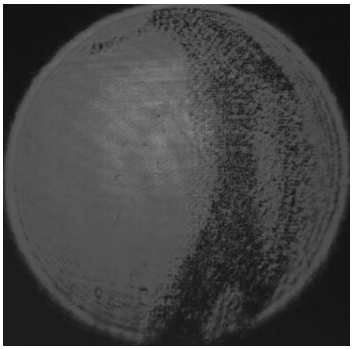


Рис. 1. Оптическое изображение дефектного прозрачного материала

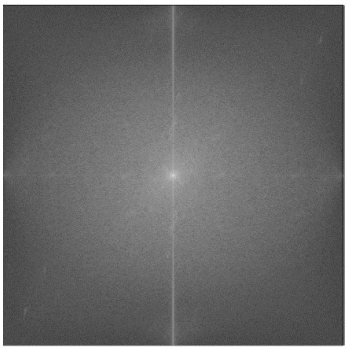


Рис. 2. Рассчитанный фурье-образ изображения дефектного прозрачного материала

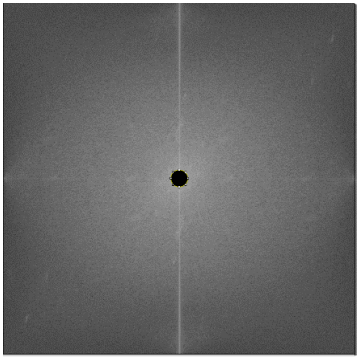


Рис. 3. Рассчитанный фурье-образ изображения дефектного прозрачного материала с исключённой основной гармоникой

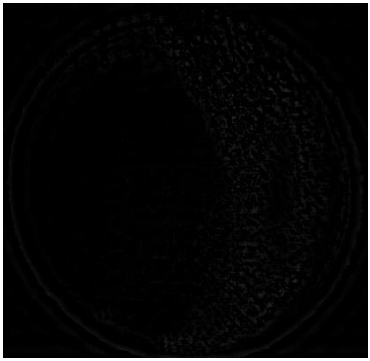


Рис. 4. Изображение дефектного прозрачного материала, восстановленное по фурье-образу

С.В. ВАСИЛЬЕВ, И.В. ЖИГУЛИНА, Д.А. ДЕРБУШ[1]
Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, Воронеж
[1]222 Военное представительство МО РФ, Королёв

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДВИЖЕНИЯ ТОЧЕЧНЫХ ОБЪЕКТОВ

Рассмотрена возможность применения фазоэнергетических функций к решению задачи селекции движущихся объектов на тестовых видеопоследовательностях. Определены аналитические выражения для указанных функций.

S.V. VASILYEV, I.V. ZHIGULINA, D.A. DERBUSH[1]
Air Forces Academy named after Prof. N.E. Zhukovskiy and Yu.A. Gagarin, Voronezh
[1]222 Central Research Institute of Defense Ministry, Korolev

IDENTIFICATION OF THE MOVEMENT OF POINT OBJECTS

The possibility of applying phase-energy functions to solving the problem of selection of moving objects on test video sequences is considered Analytical expressions for the specified functions are defined.

Проблема идентификации движения на изображениях (видеопоследовательностях), несмотря на значительные успехи в этой области, по-прежнему остается фокусом внимания широкого круга ученых и инженеров.

В работах [1, 2] было показано, что фазоэнергетические функции ΔI_x и ΔI_y – координаты разностного векторного поля фазоэнергетической характеристики – могут быть определены по формулам

$$\Delta I_x\left(p_x, p_y\right) = \sum_{i=-M}^{M-p_x} \sum_{j} (2i + p_x)\left(f_{i,j}^{(2)} f_{i+p_x, j+p_y}^{(2)} - f_{i,j}^{(1)} f_{i+p_x, j+p_y}^{(1)} \right), \quad (1)$$

$$\Delta I_y\left(p_x, p_y\right) = \sum_{i=-M}^{M-p_x} \sum_{j} (2j + p_y)\left(f_{i,j}^{(2)} f_{i+p_x, j+p_y}^{(2)} - f_{i,j}^{(1)} f_{i+p_x, j+p_y}^{(1)} \right), \quad (2)$$

числами в скобках верхнего индекса указана взаимная очерёдность кадров.

Рассмотрим два изображения $f_{i,j}^{(1)}$ и $f_{i,j}^{(2)}$, соответствующих кадрам № 1 и № 2 некоторой видеопоследовательности. Изображения представляют из себя поля равномерной яркости (фон) с одним единственным контрастным пикселем. Тогда функции $f_{i,j}^{(1)}$ и $f_{i,j}^{(2)}$ можно представить как

$$f_{i,j}^{(1)} = f_{\Phi_{i,j}}^{(1)} + f_{об\,i,j}^{(1)} \qquad (3) \qquad\qquad f_{i,j}^{(2)} = f_{\Phi_{i,j}}^{(2)} + f_{об\,i,j}^{(2)} \qquad (4)$$

$$f_{\Phi_{i,j}}^{(1)} = f_{\Phi} = a, \forall (i,j) \qquad\qquad f_{\Phi_{i,j}}^{(2)} = f_{\Phi} = a, \forall (i,j)$$

$$f_{об\,i,j}^{(1)} = \begin{cases} c^{(1)}, (i,j) = (i_н, j_н) \\ 0, \forall (i,j) \neq (i_н, j_н) \end{cases} \qquad f_{об\,i,j}^{(2)} = \begin{cases} c^{(2)}, (i,j) = (i_к, j_к) \\ 0, \forall (i,j) \neq (i_к, j_к) \end{cases}$$

где f_{Φ} – яркость фона, $c^{(1)}$ и $c^{(2)}$ – контраст объекта в первом и втором кадрах, соответственно, $(i_н, j_н)$ – координаты объекта в первом кадре (начальное положение), $(i_к, j_к)$ – координаты объекта во втором кадре (конечное положение). Подставим модели (3) и (4) в уравнения (1) и (2):

$$\Delta I_x(p_x, p_y) = \sum_{i=-M}^{M-p_x} \sum_j (2i + p_x) \Big[\Big(f_{\Phi} + f_{об_{i,j}}^{(2)} \Big) \Big(f_{\Phi} + f_{об_{i+px,\,j+py}}^{(2)} \Big) - \Big(f_{\Phi} + f_{об_{i,j}}^{(1)} \Big) \Big(f_{\Phi} + f_{об_{i+px,\,j+py}}^{(1)} \Big) \Big] \qquad (5)$$

$$\Delta I_y(p_x, p_y) = \sum_{i=-M}^{M-p_x} \sum_j (2j + p_y) \Big[\Big(f_{\Phi} + f_{об_{i,j}}^{(2)} \Big) \Big(f_{\Phi} + f_{об_{i+px,\,j+py}}^{(2)} \Big) - \Big(f_{\Phi} + f_{об_{i,j}}^{(1)} \Big) \Big(f_{\Phi} + f_{об_{i+px,\,j+py}}^{(1)} \Big) \Big] \qquad (6)$$

Принципиальный интерес представляют значения фазоэнергетических функций в начале координат $(p_x, p_y) = (0, 0)$. Допуская неизменность контраста объекта с фоном между кадрами, можно получить более простые выражения

$$\Delta I_x(0,0) \approx 2c(2f_{\Phi} + c)(i_к - i_н) \qquad (7)$$

$$\Delta I_y(0,0) \approx 2c(2f_{\Phi} + c)(j_к - j_н) \qquad (8)$$

Из (7), (8) видно, что при постоянстве фона и контраста фазоэнергетические функции в начале координат определяются лишь величинами горизонтального и вертикального перемещения, соответственно. В случае равномерного движения объекта между кадрами видеопоследовательности значения ФЭФ в точке (0, 0) будут стационарными.

Список литературы

1. Богословский А.В., Сухарев В.А., Жигулина И.В. Векторное поле фазоэнергетического спектра изображения и видеопоследовательности // Радиотехника. 2018, № 11. С. 11-15.

2. Богословский А.В., Сухарев В.А., Жигулина И.В., Пантюхин М.А. Векторные поля, порождаемые преобразованием Фурье видеосигналом изображений // Радиотехника. 2021. № 7. С. 127-139.

УДК 535(06)+004(06)

А.В. ПАВЛОВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

К ВОПРОСУ РЕАЛИЗАЦИИ КВАНТОВО-ПОДОБНЫХ МОДЕЛЕЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ МЕТОДОМ ГОЛОГРАФИИ ФУРЬЕ

В рамках задачи построения голографического симулятора квантовой системы обработки информации дано описание схемы голографии Фурье в терминах матрицы плотности. Показано, что для реализации аналога квантового измерения необходима нелинейность в схеме, при этом система вполне классическая.

A.V. PAVLOV
ITMO University, Saint-Petersburg

ON THE IMPLEMENTATION OF QUANTUM-LIKE MODELS OF THE INFORMATION PROCESSING BY THE FOURIER HOLOGRAPHY TECHNIQUE

The task of holographic simulator for quantum-like information processing models creation is considered. Fourier-holography scheme by the density matrix apparatus is described. The key-point for the analog of quantum measuring to be implemented is non-linear unit in the holographic scheme.

В настоящее время в литературе обсуждается вопрос о природе аналогий на феноменологическом уровне между обработкой информации квантовыми системами, мозгом, искусственными нейронными сетями и голографическими схемами [1 -3]. В ряде работ, например, [2, 3], показано, что квантово-подобные модели дают адекватное описание ряда когнитивных феноменов, характерных для человека, например, контекстности при принятии решений. Этот вопрос имеет значение как в плане реализации искусственными интеллектуальными системами присущих человеку способов рассуждений, так и в плане создания классических симуляторов квантовых вычислителей и систем обработки информации. В ряде работ, например, [4], показано, что реализация таких атрибутов квантово-подобных моделей, как некоммутативность логики, возможна вполне классическими системами, например, схемой голографии Фурье, без необходимости обращения к квантовой механике. В настоящем докладе в развитие и обобщение этих результатов дан анализ $4f$ схемы голографии Фурье использованием аппарата матрицы плотности.

Рассмотрена 4*f* схема голографии Фурье с обращением волнового фронта в корреляционной плоскости в рамках задачи принятия решения как выбора из альтернатив. Дан анализ для объёмных и тонких одинарных и мультиплексных голограмм Фурье, записанных по схеме с угловым мультиплицированием плоского внеосевого опорного пучка. Показано, что при линейном обращении волнового фронта схема с одинарной объёмной голограммой (без сдвиговой инвариантности) реализует чистое состояние. Схема с мультиплексной объёмной голограммой реализует чистое состояние при условии ортогональности записанных на наложенных голограммах эталонов. Инвариантность схемы к сдвигу (тонкая голограмма) влечёт разрушение чистого состояния.

Линейная система реализует неразрушающее измерение. Для реализации аналога квантового измерения (коллапса волновой функции) необходимо ввести в схему нелинейность. Система вполне классическая, так как при принятии решения отсутствует такой атрибут квантовой системы, как случайность выбора.

Автор выражает благодарность к.ф-м.н. Н.А. Соловьеву за критическое обсуждение и замечания по представленной работе.

Работа выполнена при финансовой поддержке АНО «Промбезопасность Северо-Запад».

Список литературы

1. Loo CK., Peruš M., Bischof H. // Optics and Spectroscopy. 2005. V. 99(2). P. 218-223.
2. Khrennikov // Frontiers in Physics. 2015. V. 3(77).
3. Busemeyer J.R., et al. // Psychological Review. 2011. V. 118 (2). P. 193-218.
4. Pavlov A.V., Orlov V.V. // Quantum Electronics. 2019. V. 49 (3). P. 246-252.

УДК 535(06)+004(06)

А.А. ЖИХОРЕВА, А.В. БЕЛАШОВ, А.А. СЕМЕНОВ,
Т.Н. БЕЛЯЕВА[1], А.В. САЛОВА[1], И.К. ЛИТВИНОВ[1],
Е.С. КОРНИЛОВА[1], И.В. СЕМЕНОВА, О.С. ВАСЮТИНСКИЙ
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
[1]Институт цитологии РАН, Санкт-Петербург

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ФАЗОВАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ КЛЕТОК И ЛОКАЛИЗОВАННОЕ ФОТОДИНАМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО МОДУЛЯТОРА СВЕТА

Работа посвящена разработке экспериментальной установки для количественной фазовой визуализации клеток и локализованного освещения выбранных областей клеток с помощью пространственно-временного модулятора света на жидких кристаллах. Голографическая микроскопия цитологических образцов была реализована на основе количественной фазово-контрастной микроскопии и извлечения фазовых изображений из набора осевых интерференционных картин со сдвигом фазы опорной волны. Отображение на пространственном модуляторе света специфического дифракционного паттерна также позволило осуществить формирование заданного распределения интенсивности возбуждающего лазерного излучения в плоскости образца и тем самым осуществить локализованное фотодинамическое воздействие на фотосенсибилизированные клетки.

A.A. ZHIKHOREVA, A.V. BELASHOV, A.A. SEMENOV,
T.N. BELYAEVA[1], A.V. SALOVA[1], I.K. LITVINOV[1],
E.S. KORNILOVA[1], I.V. SEMENOVA, O.S. VASYUTINSKII
Ioffe Physical Technical Institute of the RAS, Saint-Petersburg
[1]Institute of Cytology of the RAS, Saint-Petersburg

QUANTITATIVE PHASE IMAGING OF LIVING CELLS AND LOCALIZED PHOTODYNAMIC TREATMENT USING LCOS SPATIAL LIGHT MODULATOR

We report development of an experimental setup for quantitative phase imaging of living cells and for localized irradiation of selected intracellular structures using LCOS spatial light modulator. Holographic microscopy of cytological samples was implemented using quantitative phase contrast microscopy and reconstruction of integral phase images from sets of interference patterns with shifted reference wave phase.

Generation of a specific diffraction pattern on the LSOC SLM allowed us to obtain a targeted intensity distribution of the excitation laser radiation and to perform a localized photodynamic treatment of photosensitized cells.

На сегодняшний момент пространственно-временные модуляторы света (ПВМС) на основе жидких кристаллов активно используются для решения разных задач, включая разработку и создание дифракционных оптических элементов, адаптивную модуляцию волнового фронта или количественную фазовую визуализацию прозрачных объектов. Столь широкие возможности и сферы использования этих приборов позволяют создавать комбинированные оптические установки, где ПВМС может быть одновременно использован для выполнения нескольких задач.

Визуализация фазовых распределений биологических объектов с помощью ПВМС была реализована на основе метода количественной фазово-контрастной микроскопии. В рамках данного подхода освещение объекта в узком диапазоне углов с помощью кольцевой апертуры в плоскости диафрагмы конденсора позволяет в плоскости, сопряжённой плоскости образца, разделить свет, рассеянный биологическим объектом (предметная волна), и свет, прошедший через образец без искажений (опорная волна). Расположение ПВМС в плоскости, сопряжённой плоскости образца, позволило вносить произвольный фазовый сдвиг в опорную волну и регистрировать за счёт этого несколько осевых интерференционных картин, а впоследствии восстановить фазу предметной волны с использованием метода фазовых шагов.

Для осуществления локализованного фотодинамического воздействия на клетки к экспериментальной установке может быть добавлено дихроичное зеркало, с помощью которого в оптический путь может быть введено излучение полупроводникового лазера с длиной волны, соответствующей спектру поглощения фотосенсибилизатора. Формирование дифракционных фазовых паттернов на ПВМС позволяет управлять лазерным излучением и фокусировать его в желаемой области клеток. Хотя из-за наличия аберраций в такой оптической системе размер сфокусированного пятна, сформированного фазовым дифракционным паттерном, оказывается несколько больше дифракционного предела, связанного с числовой апертурой микрообъектива, точность фокусировки излучения субмикрометрового размера оказывается вполне достаточной для локализованного воздействия на фотосенсибилизированные клетки и локальной генерации в них активных форм кислорода.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 21-72-10044.

УДК 535(06)+004(06)

Е.В. ТРОПИНА[1,2], К.Н. БОЛДЫРЕВ[1]
[1]Институт спектроскопии РАН, Троицк
[2]Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва

СПЕКТРОСКОПИЯ ПЛАЗМЫ КРОВИ ЧЕЛОВЕКА: БЫСТРАЯ ДИАГНОСТИКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

В настоящей работе проведено исследование спектров нарушенного полного внутреннего отражения более 500 образцов плазмы крови человека с известными биохимическими параметрами. С помощью машинного обучения создана модель, предсказывающая параметры крови по спектрам с точностью, сравнимой с классическими биохимическими методами. Показано, что данный метод позволяет быстро и безреагентно и с использованием малого объёма биоматериала проводить диагностику биохимических параметров крови.

E.V. TROPINA[1,2], K.N. BOLDYREV[1]
[1]Institute of Spectroscopy of the RAS, Troitsk
[2]National Research University Higher School of Economics, Moscow

SPECTROSCOPY OF HUMAN BLOOD: RAPID DIAGNOSTICS USING MACHINE LEARNING

In this work, we studied the attenuated total reflection spectra of more than 500 samples of human blood plasma with known biochemical parameters. Using machine learning, a model was created that predicts blood parameters from spectra with an accuracy comparable to classical biochemical methods. It has been shown that this method makes it possible to quickly and reagent-free, using a small volume of biomaterial, diagnose the biochemical parameters of blood.

Анализ биологических жидкостей играет важную роль при выявлении заболеваний, однако традиционные методы исследования времязатратны, требуют специального лабораторного оборудования и расходных материалов. Поэтому разработка быстрых, недорогих и неинвазивных методов обнаружения изменений в биожидкостях имеет важное значение, позволяющее быстрее ставить диагнозы и назначать соответствующее лечение.

Излучение среднего инфракрасного (ИК) диапазона взаимодействует с молекулами веществ, позволяя исследовать их колебания. Исследуя

ИК-спектр возможно получить уникальный «отпечаток пальца» тех молекулярных соединений, которые находятся в изучаемой пробе. По этой причине ИК-спектроскопия обладает огромным потенциалом для анализа биожидкостей благодаря своей способности предоставлять исчерпывающую информацию о химическом составе образцов. По сравнению с другими методами ИК-спектроскопия имеет множество преимуществ, таких как небольшой объём пробы, необходимый для получения спектра, минимальное время, затрачиваемое на её подготовку, а также высокая чувствительность.

Зачастую ИК-спектроскопия используется для выявления биомаркеров, ассоциированных с различными заболеваниями, такими как диабет [1], рак [2], а также сердечно-сосудистые заболевания [3]. Однако большинство предыдущих исследований было посвящено классификации биологических проб, тогда как целью данного исследования является разработка подхода к количественной характеристике состава биожидкостей с помощью ИК-спектроскопии с применением машинного обучения.

В данной работе анализ биожидкостей проводился при помощи ИК-фурье-спектрометра Bruker Alpha с использованием НПВО-приставки с кристаллом из селенида цинка. В ходе исследования был разработан протокол регистрации ИК-спектров плазмы крови человека, а также новый метод оценки её биохимических показателей на основе полученных спектров. Спектральные области от 800 до 1800 $см^{-1}$, а также от 2500 до 3500 $см^{-1}$ оказались наиболее информативными для предсказаний биохимических показателей крови при помощи используемой модели. Наибольший вклад делают сигналы амидов белков, деформация С-Н групп CH_3/CH_2 и ряд других. Результаты данного исследования важны для развития методов анализа биожидкостей и могут быть применены в клинической экспресс-диагностике.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (в рамках гранта № 19-72-10132-П).

Список литературы

1. Guang P., Huang W., Guo L., et al // Medicine. 2020. V. 15 (99). P. e19657.

2. Sitnikova V.E., Kotkova M.A., Nosenko T.N., et al. // Talanta. 2020. V. 214. No. 2. P. 120857.

3. Haas S.L, Müller R., Fernandes A., e. al // Applied Spectroscopy. 2010. V. 64. No. 3. P. 262.

УДК 535(06)+004(06)

А.В. ПРОХОРОВ[1,2], М.Ю. ГУБИН[1,2], А.В. ШЕСТЕРИКОВ[1,2], А.Н. ТОКСУМАКОВ[1], С.М. НОВИКОВ[1], Р.В. КИРТАЕВ[3], М.К. ТАТМЫШЕВСКИЙ[1,2], Д.И. ЯКУБОВСКИЙ[1], Е.И. ТИТОВА[1], Е.С. ЖУКОВА[1], Д.А. КАЗАРЯН[1], А.В. АРСЕНИН[3], В.С. ВОЛКОВ[3]

[1]Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный

[2]Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых

[3]Исследовательский центр новых технологий XPANCEO, Дубай, ОАЭ

ГИБРИДНЫЕ И ГЕТЕРОСТРУКТУРНЫЕ ВАН-ДЕР-ВААЛЬСОВЫ МЕТАПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ КОЛЛЕКТИВНЫХ И КОГЕРЕНТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ

Наступление новой эры плоской оптики связано с появлением оптических метаповерхностей, большое количество степеней свободы которых позволило изготавливать оптические элементы на единой технологической платформе. Использование гетероструктур на основе слоистых Ван-дер-Ваальсовых материалов для производства метаповерхностей открывает новые перспективы по созданию субдифракционных концентраторов электромагнитной энергии, лазеров поверхностного излучения, лазерных дисплеев и нелинейных преобразователей.

A.V. PROKHOROV[1,2], M.Yu. GUBIN[1,2], A.V. SHESTERIKOV[1,2], A.N. TOKSUMAKOV[1], S.M. NOVIKOV[1], R.V. KIRTAEV[3], M.K. TATMYSHEVSKIY[1,2], D.I. YAKUBOVSKY[1], E.I. TITOVA[1], E.S. ZHUKOVA[1], D.A. GHAZARYAN[1], A.V. ARSENIN[3], V.S. VOLKOV[3]

[1]Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

[2]Vladimir State University named after A G. and N.G. Stoletovs

[3]Emerging Technologies Research Center XPANCEO, Dubai, United Arab Emirates

HYBRID AND HETEROSTRUCTURED VAN DER WAALS METASURFACES FOR OBSERVATION OF COLLECTIVE AND COHERENT OPTICAL EFFECTS

The advent of a new era of flat optics is associated with the rise of optical metasurfaces, whose large number of degrees of freedom allowed one to fabricate optical elements on a single technological platform. The use of heterostructures based on layered van der Waals materials for fabrication of metasurfaces opens up new prospects for the creation of subdiffractive concentrators of electromagnetic energy, surface-emitting lasers, laser displays, and nonlinear converters.

Диэлектрическая нанофотоника прошла большой путь от понимания общих принципов возбуждения резонансов в диэлектрических наночастицах до практического создания наноантенн, биосенсоров и нанолазеров. Перспективное направление нанофотоники связано с использованием дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ). Они обладают уникальным сочетанием большого показателя преломления, сильной оптической анизотропии, выраженных экситонных резонансов. Мы развиваем стратегию проектирования лазерных устройств поверхностного излучения на основе интеграции ДПМ с метарезонаторами, поддерживающими квазизапертые моды (КЗМ), рис. 1а. Их особенностью является достижение сильной связи при невысоких значениях добротности. Развитием направления служат метаповерхности на основе ДПМ-материалов, формирующих гетропереходы в структуре отдельных строительных блоков, рис. 1б. Использование высокодобротных резонансов октупольных КЗМ в таких системах позволит создавать лазерные устройства пиксельного типа для формирования изображений с субдифракционным разрешением, рис. 1в, г.

Работа поддержана Российским научным фондом (гранты № 22-22-01020 и № 22-19-00738).

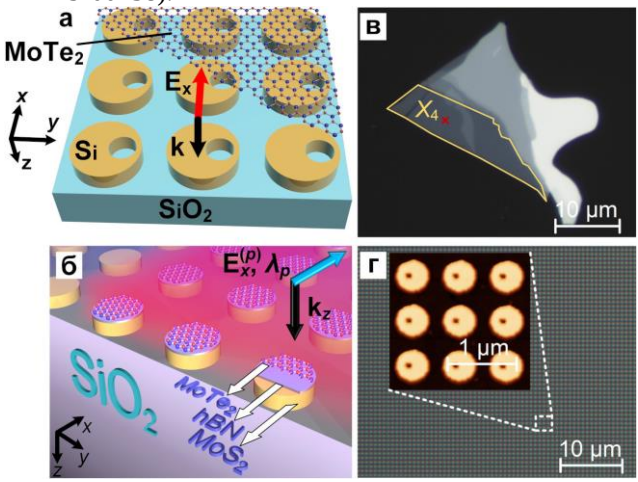


Рис. 1. Изображения усилителя фотолюминесценции на основе $MoTe_2$ плёнки, размещённой поверх поддерживающей КЗМ метаповерхности (а) и гетероструктурной MoS_2/hBN/$MoTe_2$-метаповерхности в режиме лазерной генерации (б), оптические изображения $MoTe_2$ флейка с областью X_4 в три атомных слоя (в) и кремниевой метаповерхности, длина волны КЗМ которой соответствует пику фотолюминесценции флейка (г)

УДК 535(06)+004(06)

К.Н. БОЛДЫРЕВ
Институт спектроскопии РАН, Троицк

НОВЫЕ МЕТОДЫ СПЕКТРОСКОПИИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ И ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В КВАНТОВЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Создана экспериментальная установка фотомодуляционной спектроскопии высокого разрешения для исследования различных материалов при низких температурах, в широком спектральном диапазоне и с возможностью различных видов внешнего воздействия. С помощью неё показано определение концентрации электроактивных примесей при облучении белым светом кремния и алмаза, контроль зарядовых состояний центров окраски в алмазе, проведены исследования люминесценции под действием внешних магнитных полей на кристаллах с редкоземельными ионами для квантовой сенсорики, изучено влияние рентгеновского излучения при низких температурах на экситонные пики, изучена фотопроводимости алмазов n- и p-типа.

K.N. BOLDYREV
Institute of Spectroscopy of the RAS, Troitsk

NEW METHODS OF HIGH RESOLUTION SPECTROSCOPY AND THEIR APPLICATION IN QUANTUM TECHNOLOGIES

In this work, we have created a setup and applied photomodulation spectroscopy methods to study various materials at low temperatures, in the wide spectral range and with the possibility of various types of external exposure. We will show the application of this technique, for example, to find the concentration of electroactive impurities in the terahertz range upon white light irradiation on silicon and diamond, to control the charge states of color centers in diamond, the study of luminescence under the action of external magnetic fields on crystals with rare earth ions.

Оптические модуляционные методы исследования (фотоотражение, фототермическая и фотоакустическая спектроскопия, поглощение и люминесценция под воздействием электрического, магнитного полей, напряжений и другие) представляют большой интерес, поскольку обладают такими важными преимуществами, как бесконтактность, возможность использование *in situ* и высокая чувствительность. Прежде всего, такие методы применяются для исследования полупроводников и полупроводниковых структур из-за большого разнообразия физических эффектов в них. Однако все эти методы обычно применяются при

комнатной температуре и со спектрометрами низкого спектрального разрешения. В данной работе мы создали установку и применили методы фотомодуляционной спектроскопии для исследования различных материалов при низких температурах (до 2.5 К), в широком спектральном диапазоне (от ТГц до УФ), с высоким спектральным разрешением (до 0.001 $см^{-1}$) и с возможностью различных видов воздействия.

Наиболее интересные результаты были получены для монокристаллов $LiYF_4$:Ho [1 - 4]. В спектрах люминесценции кристаллов впервые обнаружены сверхтонкая и изотопическая структуры [1 -], антипересечения сверхтонких уровней во внешнем магнитном поле [1, 2] и связанные с ними дополнительные структуры [2], деформационные расщепления [1, 2], особенности в синглет-синглетных переходах [3]. Среди других результатов, полученных с помощью данной методики, следует отметить гигантское деформационное расщепление линий в спектрах псевдокубических кристаллов перовскита $LaAlO_3$ [5, 6], изотопических сдвигов в алмазах с центрами окраски SiV [7]. Кроме того, были определены концентрации электроактивных примесей в кремнии [8] и алмазе [9, 10], показан контроль зарядовых состояний центров окраски в алмазе [11, 12] и т.д.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (в рамках гранта № 19-72-10132-П).

Список литературы

1, Boldyrev K.N., Malkin B.Z., Popova M.N. // Light:Sci.&Appl. 2022. V. 11. P. 245.
2. Boldyrev K.N., Popova M.N., et al. // Phys. Rev. B Rap.Comm. 2019. V. 99. P. 041105(R).
3. Boldyrev K.N., Malkin B.Z., Popova M.N. // J.Lumin. 2022. V. 247. P. 118902.
4. Boldyrev K.N., Popova M.N. // J.Lumin. 2022. V. 252. P. 119340.
5. Boldyrev K.N., Abishe N.M., et al. // Opt. Mat. X. 2022. V. 14. P. 100155.
6. Boldyrev K.N., Abishev N.M., et al. // Phys. Rev. B. 2021. V. 103. P. 054103.
7. Ralchenko V.G., Sedov V.S., et al. // ACS Photonics. 2019. V. 6. No. 1. P. 66-72.
8. Болдырев К.Н., Болдырев Н.Ю., Кириллин Р.В.// Известия РАН. Серия Физическая. 2013. Т. 77. № 12. С. 727-1731.
9. Blank V.D., Boldyrev K.N., et al. // Phys. Rev. B. 2020. V. 102. P. 115153.
10. Boldyrev K.N., Klimin S.A., et al. // Materials. 2022. V. 15. P. 9048.
11. Sektarov E.S., Sedov V.S., et al. // Physica Status Solidi A. 2022. V. 220. No. 4. P. 2200283.
12. Boldyrev K.N., Sektarov E.S., et al. // Phil. Trans. R. Soc. A. 2023. P. 20230170.

УДК 535(06)+004(06)

А.Ю БЫКОВСКИЙ
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

ВЗАИМНАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ ДАННЫХ АВТОНОМНЫМИ АГЕНТАМИ, ИСПОЛЬЗУЮЩИМИ КЛАССИЧЕСКИЕ И КВАНТОВЫЕ КАНАЛЫ СВЯЗИ

Рассмотрены схемы многозначно-логической верификации массивов квантовых и классических данных, которыми взаимно обмениваются роботизированные агенты с целью проверки аутентичности полномочий и целостности устройств. Представлены процедуры и алгоритмы для схем верификации без раскрытия данных и с невозможностью отказа от обязательств. Обсуждается метод фрагментарной 2D проекции многопараметрического вектора состояния системы для ускоренной визуальной проверки.

A.Yu. BYKOVSKY
Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

MUTUAL DATA VERIFICATION BY AUTONOMOUS AGENTS, USING CLASSIC AND QUANTUM DATA LINKS

The schemes are discussed for multiple-valued logic based verification of classic and quantum data arrays, used in mutual data exchange for authenticity and integrity checks. Procedures and algorithms are presented for the verification without data disclosing and for the bit commitment scheme. The method is discussed of fragmentary 2D mapping of multi-parametrical state vector for quick visual checks.

Воздушные и волоконные квантовые передающие линии в коммуникационных сетях автономных агентов создают новые возможности для защиты информации [1] в устройствах беспилотного транспорта, сервисных роботах или производственных системах. Однако, квантовые линии не защищены от технических и искусственных помех, а также от полного блокирования квантовой линии. Тем не менее, формирование запаса случайных одноразовых квантовых ключей и создание специальных алгоритмов позволяет построить целый ряд процедур удаленной верификации автономных мобильных агентов и взаимной проверки их полномочий без раскрытия данных о системе.

Целью работы является исследование методов многозначной логики для построения гибкой структуры верифицирующих данных, сочетающих одноразовые случайные коды и параметры подсистем агентов.

Преимуществом многозначной алгебры Аллена–Живона [2] является лёгкость формирования многопараметрических функций большой размерности, задаваемых в рамках гетерогенной логической архитектуры агента, а также простота описания квантовых и классических сигналов.

На рис. 1 показана базовая схема построения смешанной верифицирующей последовательности путём обмена случайными ключами и реальными техническими параметрами между подсистемами агента и сотрудничающими внешними агентами. Кроме того, в схему взаимной верификации агентов может быть встроен произвольный квантовый протокол и уникальный кодовый язык общения данного коллектива агентов. Частично используя схему блокчейна [3], для важных данных во внешней сети можно реализовать распределённые резервные хранилища. Для быстрого визуального контроля экспертом выборок данных, помимо автоматических процедур может быть использована схема отображения вектора состояния системы на логические 2D-диаграммы.

Ряд необходимых алгоритмов демонстрируется на уровне микроассемблерных подпрограмм и микроконтроллерных схем.

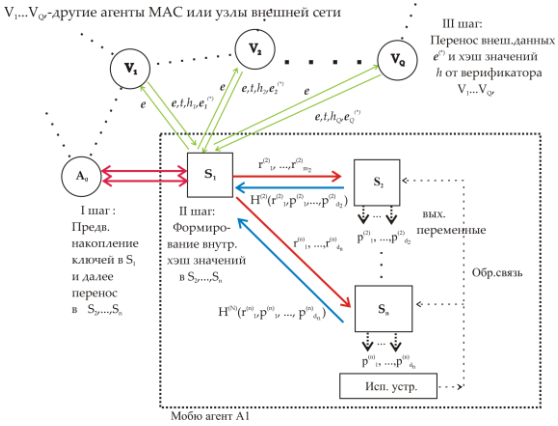


Рис. 1. Базовая схема построения верифицирующих смешанных массивов из квантовых ключей и технических параметров в паре основных взаимодействующих агентов A_0-A_1 и в лояльных узлах V_i

Список литературы

1. Parekh D., Poddar N., et al. // Electronics. 2022. V. 11 (14). P. 2162.
2. Bykovsky A.Yu., Vasiliev N.A. // Appl. Syst. Innov.2023. V. 6 (2). P. 51.
3. Li Z., Zhong R.Y., et al. // Robotics and Comp.-Integrated Manuf. 2021. V. 70 (1). P. 102124.

УДК 535(06)+004(06)

Н.В. ПЕТРОВ[1,2], Е.В. РАБОШ[1], Н.С. БАЛБЕКИН[1]
[1]Университет ИТМО, Санкт-Петербург
[2]Харбинский инженерный университет, Циндао, Китай

ПОДХОДЫ К ОЦИФРОВКЕ ИНФОРМАЦИИ, СОДЕРЖАЩЕЙСЯ В ИЗОБРАЗИТЕЛЬНЫХ ГОЛОГРАММАХ

В работе рассмотрены подходы, применяемые для преобразования информации о форме объектов, содержащейся в изобразительных голограммах в цифровой формат. Проведён анализ существующих в этой области технологий и рассмотрены их потенциальные применения.

N.V. PETROV[1,2], E.V. RABOSH[1], N.S. BALBEKIN[1]
[1]ITMO University, Saint-Petersburg
[2]Harbin Engineering University, Qingdao, China

APPROACHES TO DIGITIZATION OF INFORMATION CONTAINED IN DISPLAY HOLOGRAMS

The report examines the approaches used to convert information about the shape of objects contained in display holograms into a digital format. The analysis of existing technologies in this field is carried out and their potential applications are considered.

На сегодняшний день наблюдается устойчивая тенденция развития цифровых технологий, которая стимулирует необходимость преобразования информации из аналогового формата в цифровой (АЦ-преобразование). В методах оптической голографии АЦ-преобразование осуществляется с помощью цифровой голографии, однако, данные методы применяются к волнам, несущим информацию о взаимодействии с реальными объектами. Методов, ориентированных на оцифровку волн, формирующих трёхмерное изображение при считывании изобразительных голограмм не очень много, сведения о них разрознены, что затрудняет их анализ. В данной работе представлена классификация техник, решающих обозначенную задачу, а также смежных к ним техник (рис. 1).

Также нами было предложено использование метода фотограмметрии для оцифровки восстановленного голографического изображения объекта [2] (рис. 2а и 2б) и для контроля состояния дифракционной структуры изобразительной голограммы [3] (рис. 2в).

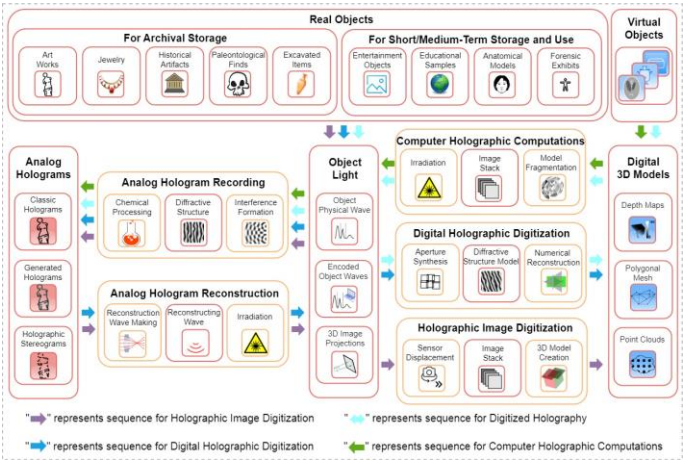


Рис. 1. Подходы для ЦА- и АЦ-преобразований информации в изобразительной голографии [1]

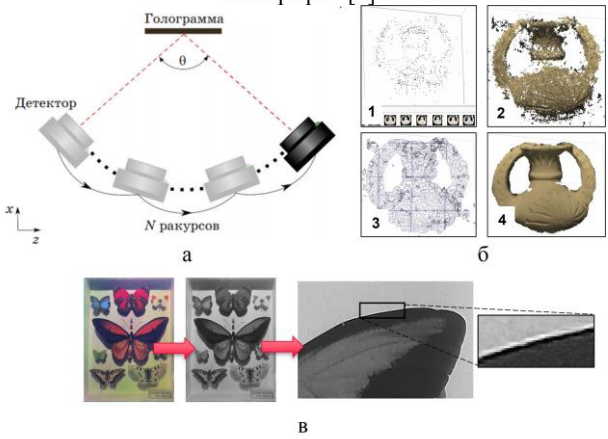


Рис. 2. Схема фотограмметрической съёмки для получения оцифрованных голографических изображений (а), необходимых для построения трёхмерной цифровой модели (б) [2] и для цифровой обработки изображений по цветовым каналам в градациях серого (в) [3]

Список литературы

1. Rabosh E.V., Balbekin N.S., Petrov N.V. // J. Opt. Soc. Am. A. 2023. V. 40. P. B47.
2. Rabosh E.V., et al. // J. Opt. Soc. Am. A. 2023. V. 40. P. B57.
3. Рабош Е.В. и др. // Оптический журнал 2023. Т. 90. С. 35.

УДК 535(06)+004(06)

А.Н. ПУТИЛИН[1,2], С.Е. ДУБЫНИН[1], Н.А. ПУТИЛИН[1,2],
С.С. КОПЕНКИН[1,3], Ю.П. БОРОДИН[1,2,3]
[1]Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва
[2]Московский государственный университет геодезии и картографии «МИИГАиК»
[3]МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВОЛНОВОДОВ НА КАЧЕСТВО ИЗОБРАЖЕНИЯ В HMD НА ВОЛНОВОДНЫХ ГОЛОГРАММАХ

Приведены результаты исследования влияния погрешностей формы волноводов на качество изображения, формируемого в HMD-системах на основе волноводных голографических перископов (ВГП). Определены оценочные требования к допускам на клиновидность, отклонение от плоскостности (сферичность, цилиндричность и другие). Проводилось как моделирование ВГП в собственных специализированных программах, так и исследование экспериментальных образцов.

A.N. PUTILIN[1,2], S.E. DUBYNIN[1], N.A. PUTILIN[1,2],
S.S. KOPENKIN[1,3], Yu.P. BORODIN[1,2,3]
[1]Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow
[2]Moscow State University of Geodesy and Cartography "MIIGAiK"
[3]MIREA – Russian Technological University, Moscow

INFLUENCE OF WAVEGUIDE MANUFACTURING ERRORS ON IMAGE QUALITY IN HMD ON WAVEGUIDE HOLOGRAMS

The results of investigations of waveguide shape errors and its influence on the image quality in HMD systems based on waveguide holographic periscopes (VGP) are presented. We determined the estimated requirements for tolerances for wedging, deviation from flatness (sphericity, cylindricity, etc). The computer simulations of VGP and the experimental samples recording was performed.

Одним из активно развивающихся направлений современной оптики является создание систем дополненной реальности, среди которых особый интерес вызывают наголовные системы (HMD) [1]. В качестве устройств совмещения виртуального и реального изображений на данный момент наибольшее распространение получили волноводные голографические перископы (ВГП), являющиеся плоскопараллельной пластиной

(волноводом) с нанесёнными на её поверхность голографическими дифракционными решётками [2, 3]. С учётом начала мелкосерийного производства подобных систем особенно важной задачей становится адекватное определение требований к качеству изготовления волновода. Для современных схем ВГП это не было ещё в полной мере сделано.

Для определения влияния погрешностей изготовления волновода на качество виртуального изображения было необходимо выполнить моделирование с учётом:

а) анализа работы ВГП с двумерной мультипликацией зрачка, которые используются в современных системах;

б) анализа изображения в пределах заданного выходного зрачка;

в) учёта особенностей глаза как отдельной системы анализа изображения.

В специально созданной программе выполнялась трассировка лучей в непоследовательном режиме для различных схем ВГП, на рис. 1а показана схема Wave Optics. Вводились соответствующие искажения в форму волновода (рис. 1б) и анализировалась их влияние на качество изображения в отдельных точках выходного зрачка (при перемещении глаза) и для разных углов поля зрения (рис. 1в) – поле 5 угловых минут).

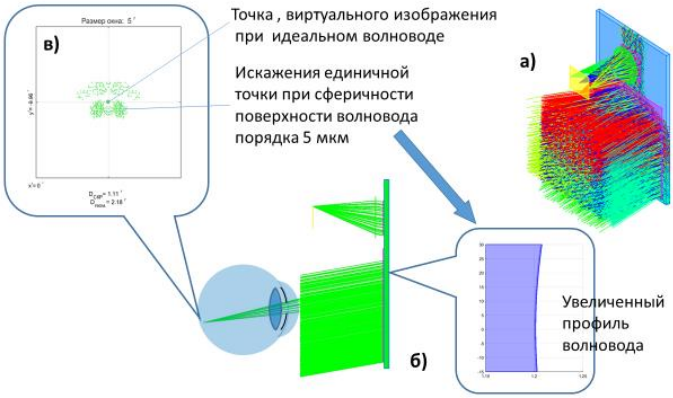


Рис. 1. Моделирование искажений в схеме HMD с наложенными решётками

Список литературы

1. Kress B.C., Pace M. // Light: Advanced Manufacturing. 2022. V. 3. No. 4. P. 771-801.

2. Putilin A.N., Morozov A.V., Kopenkin S.S., et al. // Optics and Spectroscopy. 2020. V. 128. No. 11. P. 1828-1836.

3. Solomashenko A., Kuznetsov A., Nikolaev V., et al. // Applied Sciences. 2022. V. 12. No. 21. P. 11281.

УДК 535(06)+004(06)

Н.М. ГАНЖЕРЛИ, С.Н. ГУЛЯЕВ[1], Д.А. ИЛЬЮШИНА[1],
И.А. МАУРЕР
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
[1]Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНТРНАПРАВЛЕННОЙ СХЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ РЕЛЬЕФНО-ФАЗОВОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ

Проведена регистрация голографических рельефно-фазовых решёток с пространственной частотой от 550 до 1300 мм$^{-1}$ на фотоматериалах ПФГ-01 и ПФГ-03М при использовании схемы записи во встречных пучках.

N.M. GANZHERLI, S.N. GULYAEV[1], D.A. ILYUSHINA[1],
I.A. MAURER
Ioffe Physical Technical Institute of the RAS, Saint-Petersburg
[1]Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

USING A COUNTER-DIRECTIONAL SCHEME FOR REGISTERING A PHASE-RELIEF SURFACE HOLOGRAPHIC STRUCTURE

Holographic relief-phase gratings with a space frequency from 550 to 1300 mm^{-1} have been registered on photographic materials PFG-01 and PFG-03M using a recording scheme in counter beams.

Для получения рельефных голографических решёток наряду с симметричной оптической схемой записи в сходящихся пучках возможно использование голографической регистрации схемы во встречных пучках (контрнаправленная схема регистрации). В этом случае пространственную частоту решётки на поверхности можно варьировать в широких пределах за счёт изменения наклона штрихов решётки внутри фотоматериала. Для эксперимента был выбран вариант, в котором отражённый от зеркала лазерный пучок (объектный) является обращённым по отношению к падающему (опорному) пучку. В такой оптической схеме можно легко регулировать пространственную частоту поверхностной решётки путём поворота фотопластинки, которая помещается перед зеркалом.

В эксперименте излучением He-Ne лазера с длиной волны 0,63 мкм записывались первичные амплитудные структуры в виде серебряного

изображения наклонных штрихов в объёме проявленной фотоэмульсии. Общей задачей последующей фотохимической обработки фотопластинок являлась инициация поверхностной решётки, осуществляемая с одновременным уничтожением внутренней голографической структуры. При этом ключевыми операциями обработки являлись облучение фотоэмульсии коротковолновым УФ-излучением [1], вызывающим избирательную фотодеградацию желатинового слоя, и последующее травление различными реагентами [2].

На фотоматериалах ПФГ-01 и ПФГ-03М были получены голографические структуры с дифракционной эффективностью (ДЭ) от 0,015 до 1,13 %. При уменьшении пространственной частоты решёток с 1300 до 550 мм$^{-1}$ на фотоэмульсии ПФГ-01 ДЭ возрастала в 75 раз. Все образцы демонстрировали очень слабую угловую зависимость ДЭ. Ширина брэгговского максимума на пространственной частоте 550 мм$^{-1}$ (фотоматериал ПФГ-03М) составляла величину порядка 40 º, которая соответствует эффективной толщине решётки < 1,3 мкм, что гораздо меньше общей толщины фотоэмульсионного слоя 6 - 7 мкм.

Прямые измерения глубины рельефа для фотоматериала ПФГ-03М на пространственной частоте 550 мм$^{-1}$, полученные с помощью интерферометра МИИ-4 (рис. 1), и вычисленные на основе теории тонких голограмм [3] значения ДЭ (0,78 %) хорошо совпадают с полученными экспериментальными значениями ДЭ 0,7 - 0,74 %.



Рис. 1. Интерференционная картина рельефа

Результаты работы показали возможность записи тонких рельефно-фазовых структур в голографической схеме регистрации во встречных пучках.

Список литературы:

1. Гуляев С.Н., Ратушный В.П. // Оптический журнал. 2003. Т. 70. № 2. С. 45-49.
2. Ганжерли Н.М., Гуляев С.Н. и др. // Оптика и спектр. 2022. Т. 130. № 9. С. 1385-1388.
3. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. М.: Мир, 1973.

УДК 535(06)+004(06)

Д.В. СОШНИКОВ[1,2], Л.Л. ДОСКОЛОВИЧ[1,2], А.П. ПОРФИРЬЕВ[1,2]
[1]Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара
[2]Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева

ГРАДИЕНТНЫЙ МЕТОД РАСЧЁТА КАСКАДНЫХ ДОЭ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В ЗАДАЧЕ КЛАССИФИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Рассмотрен градиентный метод расчёта каскадных фазовых дифракционных оптических элементов (ДОЭ). Получены явные выражения для производных функционала ошибки по фазовым функциям каскадного ДОЭ. Рассмотрено применение метода в задаче оптической классификации изображений. Проведён оптический эксперимент с рассчитанным ДОЭ, реализованном на фазовом пространственном модуляторе света, для классификации рукописных цифр. Результаты численного моделирования и экспериментальных исследований показали высокую точность классификации, превышающую 93 %.

D.V. SOSHNIKOV[1,2], L.L. DOSKOLOVICH[1,2], A.P. PORFIREV[1,2]
[1]Image Processing Systems Institute – Branch of the Federal Scientific Research Centre "Crystallography and Photonics" of the RAS, Samara
[2]Samara National Research University

GRADIENT METHOD OF CASCADED DOE DESIGN AND ITS APPLICATION IN THE PROBLEM OF IMAGE CLASSIFICATION

A gradient method for designing cascaded phase diffractive optical elements (DOEs) is considered. Explicit expressions are obtained for the derivatives of the error functional with respect to the phase functions of the cascaded DOE. The method is applied to the problem of optical image classification. An optical experiment was carried out with the designed DOE implemented using a phase spatial light modulator for classifying handwritten digits. Numerical simulation and experimental results demonstrated high classification accuracy exceeding 93 %.

Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) являются предметом интенсивных исследований, поскольку позволяют эффективно решить широкий класс задач по преобразованию и фокусировке когерентного излучения. Для расчёта ДОЭ используются различные итерационные алгоритмы, включающие алгоритм уменьшения ошибки и его различные

варианты. В то же время данные алгоритмы имеют ограниченную функциональность и не предназначены для расчёта так называемых каскадных ДОЭ, состоящих из нескольких последовательно расположенных фазовых ДОЭ.

В данной работе предложен градиентный метод расчёта каскадных ДОЭ в рамках скалярной теории дифракции и рассмотрено его применение в задаче оптической классификации [1]. Опишем данную задачу. Пусть во «входной» плоскости генерируются световые поля, соответствующие изображениям объектов N различных классов. Данные поля распространяются через каскадный ДОЭ и в результате в выходной плоскости формируются световые поля с некоторыми распределениями интенсивности. В выходной плоскости заданы N пространственно разделённых «целевых» областей, соответствующих объектам различных классов. Для решения задачи классификации требуется, чтобы при входном изображении объекта j-го класса максимум из «энергий» (интегралов от сформированного распределения интенсивности по целевым областям) достигался в j-ой целевой области. В работе были рассмотрены функционалы ошибок, зависящие от фазовых функций каскадного ДОЭ и описывающие требуемое функционирование ДОЭ в задаче классификации. Для производных данных функционалов были получены явные выражения [2]. Далее с использованием градиентного метода в идеологии нейронных сетей были рассчитаны одиночный ДОЭ и каскад из двух ДОЭ для классификации изображений рукописных цифр из базы данных MNIST. На основе численного моделирования было получено, что точность классификации составляет 97,2 % для одиночного ДОЭ и 98 % для каскада из двух ДОЭ. Для сравнения отметим, что точности классификации в работах [1, 3], полученные с помощью каскадов из 5 - 10 ДОЭ составили от 91,8 до 93,4 %.

Результаты численного моделирования были подтверждены экспериментальными исследованиями. Рассчитанный одиночный ДОЭ был реализован в геометрии 4F-системы на фазовом пространственном модуляторе света. Достигнутая в экспериментах точность классификации превысила 93 %, что соответствует мировым достижениям [1, 3].

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (госзадание Самарскому университету, проект FSSS-2024-0016).

Список литературы

1. Lin X., Rivenson Y., Yardimci N.T., Veli M., et al. // Science. 2018. V. 361. P. 1004.
2. Soshnikov D.V., Doskolovich L.L., et al. // Photonics. 2023. V. 10 (7).
3. Chen H., Feng J., Jiang M., et al. // Engineering. 2021. V. 7, P. 1483.

УДК 535(06)+004(06)

А.В. ЧЕРНЫХ[1], А.С. ЕЗЕРСКИЙ[1], Е.Г. ЦИПЛАКОВА[1],
Н.В. ПЕТРОВ[1,2], И.И. РАКОВ[3], Н.И. РАГИНОВ[3],
Д.В. КРАСНИКОВ[3], А.В. РАДИВОН[4], Г.М. КАТЫБА[4],
М.Г. БУРДАНОВА[4]

[1]Университет ИТМО, Санкт-Петербург
[2]Харбинский инженерный университет, Циндао, Китай
[3]Сколковский институт науки и технологий
[4]Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СПИРАЛЬНЫХ ЗОННЫХ ПЛАСТИН ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ВИХРЕВЫХ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ПУЧКОВ

Предложен дизайн бинарной спиральной зонной пластины для терагерцовых приложений, особенность которого заключается в подавлении безвихревой компоненты в фокусе первого дифракционного порядка. Спиральная зонная пластина рассчитана как бинаризованная осевая голограмма по методу голографии Ли. Проведена апробация дизайна в схеме с растровым сканированием и лампой обратной волны, работающей на частоте 0,340 ТГц.

A.V. CHERNYKH[1], A.S. EZERSKII[1], E.G. TSIPLAKOVA[1],
N.V. PETROV[1,2], I.I. RAKOV[3], N.I. RAGINOV[3], D.V. KRASNIKOV[3],
A.V. RADIVON[4], G.M. KATYBA[4], M.G. BURDANOVA[4]

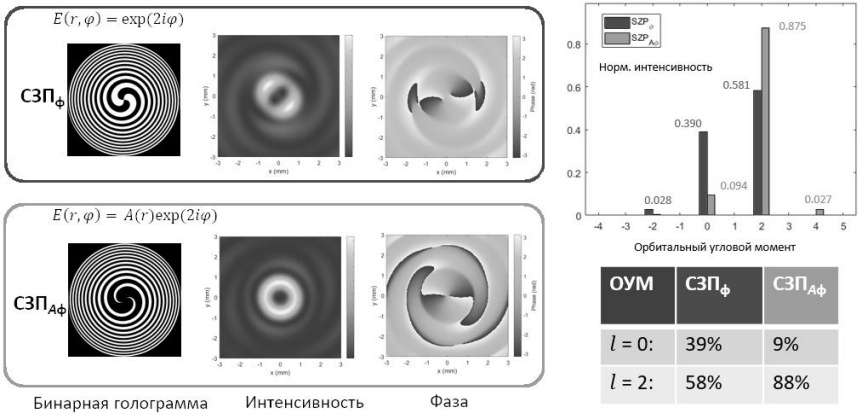
[1]ITMO University, Saint-Petersburg
[2]Harbin Engineering University, Qingdao, China
[3]Skolkovo Institute of Science and Technology
[4]Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

IMPROVING THE EFFICIENCY OF SPIRAL ZONE PLATES FOR GENERATION OF VORTEX TERAHERTZ BEAMS

The design of the binary spiral zone plate for terahertz applications is proposed, the peculiarity of which is the suppression of the vortex-free component at the focus of the first diffraction order. The spiral zone plate is calculated as a binarized axial hologram via the method of Lee holography. The design has been validated in a raster-scanning scheme with the backward wave oscillator operating at 0.340 THz.

Терагерцовое излучение находит множество применений в таких приложениях как телекоммуникации, спектроскопия, микроскопия,

призрачная визуализация, характеризация материалов. Использование особенностей структурированного излучения расширяет возможности данных приложений [1]. Широкое распространение получил класс вихревых пучков, благодаря свойствам ортогональности своих мод и аксиально симметричной дифракции в свободном пространстве [2]. Одним из подходов формирования вихревых пучков являются спиральные зонные пластины (СЗП). Однако, из-за того, что дифракционные порядки имеют общую ось, их невозможно разделить установкой апертуры. В работе предложен дизайн СЗП (СЗП$_{Аф}$ на рис. 1), который рассчитывался как осевая голограмма по методу Ли [3]. В ней, помимо геликоидального фазового набега, кодировалась амплитудная модуляция центральной зоны в виде степенной функции. Благодаря такому подходу нулевой дифракционный порядок имеет провал интенсивности в области фокуса, а содержание целевой вихревой моды возрастает и может достигать порядка 80 - 90 %. Эффективность предложенного дизайна была подтверждена экспериментально в схеме с растровым сканированием и лампой обратной волны, работающей на частоте 0,340 ТГц. Авторы выражают благодарность инициативе ИТМО-МФТИ-Сколтех "Клевер".



ОУМ	СЗП$_ф$	СЗП$_{Аф}$
l = 0:	39%	9%
l = 2:	58%	88%

Рис. 1. Модели осевых голограмм и формируемые в фокусе распределения интенсивности и фазы для классического (тёмно-серый) и оптимизированного (светло-серый) дизайнов спиральных зонных пластин (СЗП), а также модовый состав углового орбитального момента данных пучков

Список литературы

1. Minkevičius L., et al. // Optics Express. 2019. V. 27 (25). P. 36358-36367.
2. Petrov N.V., et al. // Light Adv. Manuf. 2022. V. 3(4). P. 1.
3. Lee W.H. // Applied Optics. 1974. V. 13 (7). P. 1677-1682.

УДК 535(06)+004(06)

П.А. ИВАНОВ
Ярославский государственный технический университет

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ ФИЛЬТР С ОБОБЩЁННЫМИ ОГРАНИЧЕНИЯМИ В ЗАДАЧАХ РАСПОЗНАВАНИЯ ИСКАЖЁННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Приводятся результаты моделирования на ПЭВМ распознавания двумерных полутоновых изображений, подвергнутых геометрическим преобразованиям, а также межклассовое распознавание с помощью улучшенной версии некоторых корреляционных фильтров.

P.A. IVANOV
Yaroslavl State Technical University

GENERALIZED CONSTRAINT CORRELATION FILTER IN PROBLEMS OF DISTORTED IMAGES RECOGNITION

The results of PC modeling of 2D grayscale images with geometrical deformations and several classes recognition with the usage of enhancement of several correlation filters are given.

В данной работе в качестве объекта исследования использовались инвариантные корреляционные фильтры (КФ) с обобщёнными ограничениями, которые позволяют улучшить параметры выходных корреляционных пиков для некоторых алгоритмов синтеза, в основу которых закладывается вычисление некоторого инвариантного параметра, таких как MSE, ONV и ASM. Указанные алгоритмы синтеза были проверены, например, в [1 - 3]. Были проведены эксперименты по компьютерному моделированию распознавания изображений, подвергнутых геометрическим преобразованиям поворота и изменению масштаба, а также межклассовому распознаванию изображений.

В основе улучшения алгоритма построения лежит конструкция:

$$H = MSE + \gamma * ASM + \beta * ONV. \quad (1)$$

Здесь H – вычисляемый фильтр, β и γ – соответствующие весовые коэффициенты, $\gamma = (1 - \psi) / \psi$ и $\beta = (1 - \lambda) / \lambda$, где значения параметров ψ и

λ варьируются от 0 до 1, оказывающие влияние на величину соответствующего слагаемого.

Для каждого случая вычислялись значения корреляционных функций набора входных изображений с фильтром, нормированные на величину максимального пика (количественные характеристики корреляции)

$$C(x_c, y_c) = \iint_{\pm\infty} f^*_{эт}(x, y) * f_{вх}(x - x_c, y - y_c)dxdy. \qquad (2)$$

В качестве среды моделирования был выбран пакет Scilab, как наиболее подходящий для подобного рода задач. В качестве исходных изображений использовалась база данных объекта типа “самолет” (рис. 1), подвергнутых различным преобразованиям геометрии.



Рис. 1. Изображение распознаваемого объекта

На основе указанной базы были синтезированы фильтры), после чего вычислялись корреляции (корреляционные функции) всех объектов из этой же базы данных с построенными фильтрами.

Результаты моделирования позволяют надеяться на успешное применение таких фильтров, особенно для задач межклассового распознавания изображений.

Список литературы

1. Vijaya Kumar B.V.K.. Tutorial survey of composite filter design for optical correlators // Appl. Opt. 1992. V. 31. P. 4773-4801,

2. Иванов П.А. Квадратичные и полиномиальные корреляционные фильтры в задачах распознавания изображений на базе оптоэлектронных процессоров // Математика и естественные науки. Теория и практика: Межвуз. сб. науч. тр. Ярославль: Издат. дом ЯГТУ, 2017. Вып. 12. С. 219-227.

3. Ivanov P.A. Modeling of scaled and rotated images recognition using different variants of invariant correlation filters // Proc. SPIE. 2016. V. 9845. P. 9845OT.

УДК 535(06)+004(06)

Н.Г. СЦЕПУРО, М.С. КОВАЛЕВ, Т.З. МИНИХАНОВ[1],
Е.Ю. ЗЛОКАЗОВ[1]
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва
[1]Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИЗМЕРЕНИЕ ВОЛНОВЫХ АБЕРРАЦИЙ С ПОМОЩЬЮ ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО КОРРЕЛЯТОРА ИЗОБРАЖЕНИЯ

Данная работа посвящена проблеме применения оптического коррелятора изображений с полутоновыми или бинарными голографическими фильтрами при решении задачи по измерению волновых аберраций гомоцентрических осесимметричных оптических пучков, описываемых по полиномам Цернике до четвёртого порядка включительно.

N.G. STSEPURO, M.S. KOVALEV, T.Z. MINIKHANOV[1],
E.Yu. ZLOKAZOV[1]
Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow
[1]National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

MEASURING WAVE ABERRATIONS USING A HOLOGRAPHIC IMAGE CORRELATOR

This work is devoted to the problem of using an optical image correlator with halftone or binary holographic filters when solving the problem of measuring wave aberrations of homocentric axisymmetric optical beams, described by Zernike polynomials up to the fourth order inclusive.

Удобными и эффективными инструментами для измерения распределений интенсивности светового поля и его фазы в пределах некоторой локальной области являются датчики Гартмана [1] и Шака–Гартмана (ДШГ) [2 - 4], а также методы, которые основанные на принципах оптической интерферометрии или геометрической оптики.

Новизна данной работы заключается в усовершенствовании существующих датчиков волнового фронта, которые реализуются благодаря использованию методов корреляционного анализа и оптической согласованной фильтрации. Комплексный подход, при решении выше озвученной проблемы, привнес значительные изменения как в аппаратную, так и в алгоритмическую части детектирования волновых аберраций при помощи оптического коррелятора изображений. В частности, был оптимизирован метод синтеза голографических фильтров

для измерения волновых аберраций при различных параметрах, используемый в схеме пространственно-временного модулятора света, как в монохроматическом, так и в полихроматическом излучении.

Базовые принципы работы экспериментальных установок были взяты из оптико-электронных систем корреляционного распознавания. На рис. 1 изображена обобщённая схема экспериментальных установок, на которой видно, что излучение от твердотельного лазера при помощи телескопической системы коллимировалось и расширялось до апертуры в 10 мм.

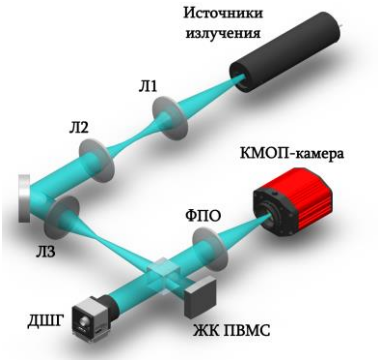


Рис. 1. Эквивалентная схема установки для анализа квазистатических волновых фронтов

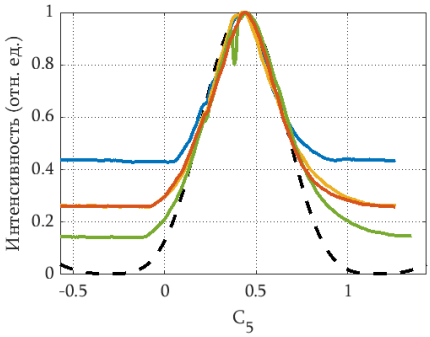


Рис. 2. Нормированные амплитуды максимумов корреляционных функций в зависимости от калибровочной длины волны λ_0 ЖК ПВМС при анализе исследуемого волнового фронта от источника излучения с длиной волны λ = 532 нм

Предложенный алгоритм синтеза был апробирован на разработанной оптической схеме, а полученные экспериментальным путём результаты были подтверждены математическими моделями (рис. 2).

Список литературы

1. Hartmann J. // Zeitschrift für Instrumentenkunde. 1900. V. 20. P. 17-27.
2. Artzner G. // Opt. Eng. 1992. V. 31 (6). P. 1311-1322.
3. Platt B.C., Shack R. // J. Refract. Surg. 2001. V. 17 (5). P. S573-7.
4. Hongbin Y., et al. // J. Micromech. Microeng. 2008. V. 18. P. 105017.

УДК 535(06)+004(06)

Э.И. ИБРАГИМОВА, И.Н. ПАВЛОВ
Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

ВЫДЕЛЕНИЕ АРТЕФАКТОВ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СКАНИРУЮЩЕЙ БЛИЖНЕПОЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ МИКРОСКОПИИ

В ходе работы были получены изображения поверхности образца из однородного материала (заготовки CD-диска без защитного покрытия) с помощью сканирующего ближнепольного оптического микроскопа. Разработан алгоритм обработки этих изображений с целью выделения артефактов, не связанных с изменением топографии поверхности. Приведены результаты применения разработанного алгоритма к полученным изображениям.

E.I. IBRAGIMOVA, I.N. PAVLOV
National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

ARTIFACT EXTRACTION ON IMAGES OBTAINED BY SCANNING NEAR-FIELD OPTICAL MICROSCOPY METHOD

In the course of the work, images of the surface of a sample from a homogeneous material (CD blank without protective coating) were obtained using a scanning near-field optical microscope. An algorithm for processing these images was developed in order to isolate artifacts not related to changes in surface topography. The results of application of the developed algorithm to the obtained images are presented.

Сканирующая ближнепольная оптическая микроскопия (СБОМ) позволяет определять не только топографию поверхности образца, но и визуализировать его оптические свойства. Однако появление артефактов на изображениях неизбежно. При резких неоднородностях на топографии поверхности зонд перемещается и изменяется расстояние зонд-образец, что, в свою очередь, приводит к изменению оптического сигнала и появлению артефактов, не связанных с оптическими неоднородностями образца. Небольшие изменения поверхности, напротив, могут не разрешаться на топографии, но также изменять расстояние зонд-образец. Таким образом, при правильном выделении различного рода артефактов, изображение, полученное в оптическом канале, может дополнить информацию о топографии поверхности, получаемую с помощью системы обратной связи, использующей тангенциальные силы скольжения.

Целью работы является разработка алгоритма обработки изображений с целью выявления артефактов на СБОМ изображениях, не связанных с перемещением зонда над образцом. Для получения СБОМ изображений использовался микроскоп NTEGRA SOLARIS, работающий в режиме сбора отражённого излучения. В качестве образцов использовались подложки с металлическим напылением.

Артефакты, связанные с перемещением зонда, будут согласованы с топографией поверхности. Поэтому вычитание топографии из СБОМ изображения позволит удалить эти артефакты [1]. На полученном изображении окажутся выделены артефакты, которые связаны с неразрешаемым микрорельефом поверхности и другими причинами [2].

На рис. 1 и 2 представлены изображения поверхности CD-диска до обработки. На рис. 3 представлено изображение, на котором выделены артефакты, не связанные с передвижением зонда, а на рис. 4 представлено изображение после удаления артефактов. Изображение практически однородно, что соответствует оптически однородной поверхности.

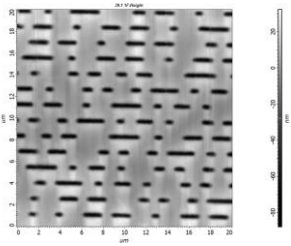


Рис. 1. Топография поверхности CD-диска

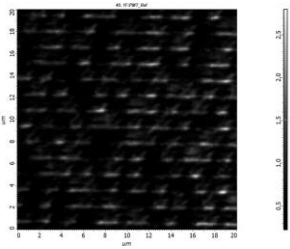


Рис. 2. СБОМ изображение поверхности CD-диска

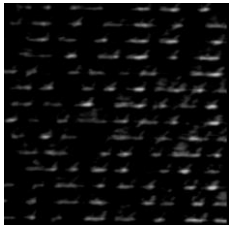


Рис. 3. Артефакты, выделенные СБОМ на изображении

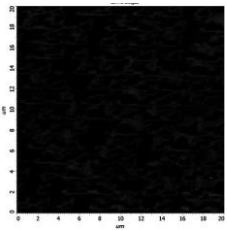


Рис. 4. Оптическое изображение после удаления артефактов

Список литературы

1. Gonzalez R.C., Woods R.E. Digital image processing, 2012.
2. Chen N., Wang Y., Liu T. // Acta Photonica Sinica. 2021. V. 50. No. 125. P. 156-159.

УДК 535(06)+004(06)

Д.Р. МАНУЧАРОВ, П.В. ПАВЛОВ, А.П. ВЛАДИМИРОВ[1,2]
Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, Воронеж
[1]Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург
[3]Федеральный научно-исследовательский институт вирусных инфекций «Виром» Роспотребнадзора, Екатеринбург

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ АВИАЦИОННОГО ТОПЛИВА МЕТОДОМ ЦИФРОВОЙ СПЕКЛ-ФОТОГРАФИИ

Представлены результаты расследования причин авиационных инцидентов по причине отказа боровых систем из-за биологического загрязнения авиационного топлива, рассмотрены пути для реализации разработанного нового способа и устройства определения биологического загрязнения авиационного топлива в условиях аэродрома, на основе анализе параметров цифровых спекл-фотографий, регистрируемых от пробы авиационного топлива.

D.R. MANUCHAROV, P.V. PAVLOV, A.P. VLADIMIROV[1,2]
Air Forces Academy named after Prof. N.E. Zhukovskiy and Yu.A. Gagarin, Voronezh
[1]Institute of Engineering Science of Ural Branch of the RAS, Yekaterinburg
[2]Federal Research Institute of Viral Infections "Virom" of Rospotrebnadzor, Yekaterinburg

METHOD FOR DETERMINING BIOLOGICAL CONTAMINATION OF AVIATION FUEL BY DIGITAL SPECKLE PHOTOGRAPHY METHOD

The results of an investigation into the causes of aviation incidents due to the failure of boron systems due to biological contamination of aviation fuel are presented, and ways to implement the developed new method and device for determining biological contamination of aviation fuel in airfield conditions are considered, based on an analysis of the parameters of digital speckle photographs recorded from a sample of aviation fuel.

За прошлый год по причине присутствия в топливной системе различного рода примесей и биологического загрязнения в гражданской авиации произошло 10 % авиационных инцидентов от их общего количества [1]. В настоящее время, для решения данной проблемы чаще всего применяют следующие зарубежные устройства, основанные на индикаторных методах [2, 3] обнаружения микробиологического

загрязнения: FUELSTAT®, MICROBMONITOR2® и HY-LiTE®. Проблему в оперативной оценке степени биозагрязнения авиационного топлива в условиях аэродрома можно решить, разработав и реализовав способ, основанный на использовании метода цифровой спекл-фотографии, который хорошо зарекомендовал себя как инструмент диагностики живых клеток [4, 5] и определения примесей в рабочих жидкостях [6].

Если контролируемую пробу с авиатопливом, помещённую в прозрачную кювету, осветить рассеянным лазерным излучением (спекл-полем), то на экране, расположенным на некотором расстоянии от объекта, или в плоскости его изображения, наблюдается в макроскопическом смысле однородная, но в микроскопическом смысле неоднородная структура рассеянного излучения. Неоднородности, пятна или спеклы случайного размера и яркости появляются в результате взаимной интерференции многих когерентных волн, которые распространяются от центров рассеяния со случайными амплитудами и фазами. Если в пробе авиационного топлива происходят микроскопические процессы, обусловленные развитием колоний микроорганизмов, локально изменяющие показатель преломления среды, то вследствие изменения оптической длины пути, картина спеклов будет меняться. Таким образом, регистрация сигналов динамики спеклов обладает высокой чувствительностью к изменениям оптической разности хода, которая основана на многолучевой интерференции волн, а зная динамику изменения параметров регистрируемых спекл-картин, возможно проследить процессы движения, функционирования, развития микроорганизмов и дать им количественную оценку вплоть до определения их штамма.

Список литературы

1. https://szmtu-m.favt.ru/public/materials//2/d/7/f/f/2d7fffcad0afdfbc915c0740c8a7849f.pdf. (дата обращения: 16.11.2023).

2. ASTM D7978 - 14. Standard test method for determination of the viable aerobic microbial content of fuels and associated water // Thixotropic Gel Culture Method, 2019.

3. IP 613. Determination of the viable aerobic microbial content of fuels and associated water // Thixotropic Gel Culture Method, 2014.

4. Владимиров А.П. К спекл-томографии функций живой клетки // Известия вузов. Радиофизика. 2020. Т. LXIII.Вып. 8. С. 1-14.

5. Vladimirov A.P. Dynamic speckle interferometry of microscopic and macroscopic processes in deformable media // Dream open access journal. Resource and Mechanics of materials and structures. 2015. P. 27-57.

6. Павлов П.В., Малов А.Н., Петров Н.В., Хакимов Т.М., Мартынов В.А., Манучаров Д.Р., Астахов М.О. Патент на изобретение RU 2659192 C1, 28.06.2018. Заявка № 2017121782 от 20.06.2017.

УДК 535(06)+004(06)

Н.О. ПРОХОРЕНКОВ, М.А. ВОЛЫНСКИЙ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ АРТЕФАКТОВ В ЦВЕТНЫХ ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММАХ ФРЕНЕЛЯ

В работе рассмотрено влияние фазовой информации комплексного поля объектной волны на получаемое изображение. Предложен метод фильтрации, который позволяет избавиться от артефактов, образованных под влиянием фазовой составляющей комплексного поля объектной волны.

N.O. PROKHORENKOV, M.A. VOLYNSKY
ITMO University, Saint-Petersburg

INVESTIGATION OF PHASE ARTIFACTS IN COLOUR DIGITAL FRESNEL HOLOGRAMS

Influence of phase information of the complex field of the object wave on the obtained image is considered. A filtering method is proposed, which allows to dispose of artifacts formed under the influence of the phase component of the complex field of the object wave.

Цифровая голография представляет собой метод синтеза голограмм, обработка и анализ которых осуществляется при помощи электронных вычислительных машин. В настоящее время он находит применение для выполнения широкого спектра различных задач в таких областях как медицина, защита информации, микроскопия и во многих других.

При построении и тестировании модели процессов синтеза цифровых голограмм Френеля с плоской опорной волной в широком спектральном диапазоне и восстановления комплексного поля объектной волны, в программной среде MATLAB, было обнаружено, что при тестировании модели на исходной выборке данных [1] на краях восстановленных изображений наблюдаются артефакты в виде полос.

Для того, чтобы избавится от них, был разработан метод фильтрации, принцип работы которого заключается в следующем. Оба изображения, исходное и восстановленное, из цветового пространства RGB переводились в пространство HSV после чего строились спектры пространственных частот для канала V изображений. Затем при помощи рассчитываемых коэффициентов пропорциональности были скорректированы значения спектра для восстановленного изображения на

каждой пространственной частоте в области заданного размера. После этих операций выполнялись обратные преобразования.

Для того, чтобы найти причину данных артефактов было решено изучить фазовую информацию комплексного поля объектной волны. Первоначально восстановленное изображение было представлено как совокупность трёх полутоновых изображений. Затем для каждого из них была рассчитана фаза, которая затем была развернута при помощи двумерного алгоритма развёртывания фазы [2]. Обнаружилось, что данные полосы присутствуют и в развернутой фазе комплексного поля в каждом канале изображения (рис. 1).

На данный момент предполагается, что причина появления этих артефактов может быть обусловлена особенностями численной реализации фильтрации при обработке фазовой информации комплексного поля объектной волны. Также предполагается, что причина может содержаться в наложении полосовых артефактов друг на друга при сложении трёх каналов RGB-изображения, что и приводит к возникновению данных эффектов на результирующем изображении.

В ходе работы был разработан метод фильтрации спектра пространственных частот для удаления артефактов в виде полос, появление которых вероятнее всего обусловлено особенностями численной реализации фильтрации при обработке фазовой информации комплексного поля объектной волны.

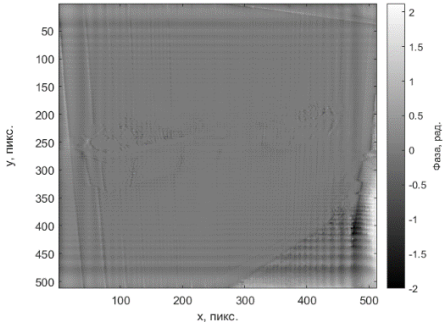


Рис. 1. Фаза восстановленного изображения

Список литературы

1. База данных TAMPERE17 noise-free image database. (дата обращения 19.05.2022) https://webpages.tuni.fi/imaging/tampere17/.

2. Zhao Z. Robust 2D phase unwrapping algorithm. MATLAB Central File Exchange. 2023. https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/68493-robust-2d-phase-unwrapping-algorithm.

УДК 535(06)+004(06)

А.С. СВИСТУНОВ, Д.А. РЫМОВ, А.В. КОЗЛОВ,
Р.С. СТАРИКОВ, П.А. ЧЕРЁМХИН
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА РЕКОНСТРУКЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ГОЛОГРАММ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ В УСЛОВИЯХ РАЗЛИЧНОЙ ОСВЕЩЁННОСТИ, ПРИ ПОМОЩИ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Для извлечения информации об объектах с голограмм, записанных в различных условиях, в том числе при засветке, предлагается использовать нейросетевой метод. Получено значительное улучшение качества восстановления амплитуды объектной волны по сравнению с прямым расчётом дифракции.

A.S. SVISTUNOV, D.A. RYMOV, A.V. KOZLOV,
R.S. STARIKOV, P.A. CHEREMKHIN
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

IMPROVING RECONSTRUCTION QUALITY OF IMAGES FROM THE HOLOGRAMS RECORDED UNDER DIFFERENT ILLUMINATION USING NEURAL NETWORKS

For reconstruction of object information from holograms that were recorded under various conditions including saturation, a neural network method was proposed. A significant improvement of the reconstructed object amplitude quality was obtained compared to the direct diffraction calculation.

Нейросетевые методы активно используются в различных областях знания, в том числе в компьютерной и цифровой голографии [1]. Машинное обучение может использоваться для различных задач, в том числе для подавления нулевого порядка дифракции во внеосевой голографии [2] и восстановления информации об 3D-сценах с осевых голограмм [3].

В работе представлен вариант использования нейросетевого подхода для восстановления амплитуды объектной волны с цифровых голограмм, зарегистрированных в различных условиях, в том числе засветки – большим числом пикселей в насыщении. Модель была обучена на синтезированных голограммах, интенсивность которых была случайным образом увеличена в 10 - 100 раз. Тренировочный набор данных состоял

из 25000 пар голограмма – изображение. Тестовый набор включал 5000 пар. В качестве объектов использовались изображения рукописных цифр из набора MNIST размерами 128 × 128 пикселей. На вход модифицированной модели нейросети U-Net подавалась голограмма, на выходе было оригинальное изображение.

Для оценки качества восстановленных изображений использовалась метрика – индекс структурного сходства. Анализировались голограммы, интенсивность которых была увеличена в 2 - 1024 раза. Для изображений, восстановленных с голограмм с увеличенной интенсивностью в 128 раз, индекс структурного сходства составил 0,84.

На рис. 1*а* приведён пример засвеченной голограммы, на рис. 1*б* – оригинальное изображение объекта, примеры восстановленных с голограммы изображений при помощи нейросети и методом прямого расчёта дифракции показаны на рис. 1*в* и 1*г*. Видно, что восстановленное изображение нейросетевым методом имеет более высокое качество.



а *б* *в* *г*

Рис. 1. Голограмма с увеличенной интенсивностью в 128 раз (*а*), оригинальное изображение (*б*), восстановленные с голограммы изображения прямым расчётом дифракции (*в*) и нейросетевым методом (*г*)

Для голограмм, засвеченных в 256 и более раз, значения метрик несколько снижаются, а на изображениях появляются искажения. При этом значения метрик остаются значительно выше, чем для изображений, полученных традиционным методом восстановления, так как там восстановленное изображение оказывается неотличимо от шума.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 22-79-10340.

Список литературы

1. Situ G. Deep holography // Light: Advanced Manufacturing. 2022. V. 3. P. 1.

2. Wang H., Li K., Jiang X., et al. Zero-order term suppression in off-axis holography based on deep learning method // Optics Communications. 2023. V. 537. P. 129264.

3. Svistunov A.S., et al. HoloForkNet: Digital hologram reconstruction via multibranch neural network // Applied Sciences. 2023. V. 13. P. 6125-6125.

УДК 535(06)+004(06)

Ю.С. БЕХТИН, А.В. ЕЛМАНОВ
Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ РЕГУЛЯРИЗАЦИИ ФУНКЦИИ РАЗМЫТИЯ ТОЧКИ И АКТИВНОГО ОБУЧЕНИЯ

Разработана адекватная параметрическая модель функции размытия точки (ФРТ). Представлена структура активного машинного обучения, как необходимый инструмент для построения моделей ФРТ. Предложенная схема подходит для восстановления изображений, обладающих различными уровнями шума.

Yu.S. BEKHTIN, A.V. ELMANOV
Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin

IMAGE RESTORATION WITH POINT SPREAD FUNCTION REGULARIZATION AND ACTIVE LEARNING

An adequate parametric model of the point spread function (PSF) is developed. An active machine learning structure is presented as the necessary tools for building PSF models. The proposed scheme is suitable for image reconstruction with different noise levels.

При фокусировке на близко расположенных объектах (менее 10 см) в так называемом макрорежиме камеры современных мобильных телефонов могут демонстрировать низкую резкость изображения, что вызвано двумя основными факторами: малая глубина резко изображаемого пространства (EDoF) и упрощённая оптическая схема, оптимизированная для объектов, находящихся на расстоянии более нескольких десятков сантиметров. Более того, если сенсор камеры монохромный или оптимизирован для инфракрасного спектра, а использование асферических элементов в оптической схеме невозможно или ограничено из-за требования к стоимости конечного продукта, камера может демонстрировать существенное ухудшение резкости. В данной работе мы ограничиваемся инфракрасной камерой, что позволяет игнорировать необходимость корректного восстановления цвета и обосновать низкое качество исходной оптической системы.

Для решения вышеуказанной проблемы применяются разнообразные методы расширения глубины резко изображаемого пространства и инверсии функции рассеяния точки (ФРТ), позволяющие одновременно

повысить резкость части изображения, находящейся в фокусе, и сделать резкой расфокусированную часть [1, 2]. В случае, когда нет возможности использовать несколько изображений одной сцены, наибольшую эффективность показывают нейросетевые методы за счёт их способности генерировать потерянные детали, однако при сильной расфокусировке их применение усложняется из-за необходимости увеличения поля сети для восстановления ФРТ большого размера.

Алгоритмы восстановления изображений, основанные на свойствах ФРТ, направлены на изучение обобщённой обратной функции ФРТ. Сначала строится модель ФРТ с помощью разложения волнового фронта или базиса ФРТ [1], а затем эта модель используется как предварительное знание для восстановления изображений с помощью контролируемого или неконтролируемого обучения (рис. 1). В отличие от работ [1, 2], в нашей работе базис ФРТ рассчитывается на основе вейвлет-преобразования.

Традиционная деконволюция работает быстро и эффективно, если требуется инвертировать ядро малого размера, но неспособна восстановить большие ядра. Многоуровневая инверсия может позволить решить данную проблему: восстанавливаем изображение в низком разрешении с малым ядром, затем с помощью легковесной нейросети переходим в более высокое разрешение, зная исходное размытое изображение в высоком разрешении и его восстановленную в низком разрешении версию.

Таким образом, дальнейшее направление исследований заключается в разработке метода интерполяции известных ФРТ для получения промежуточных данных, учитывающий физику оптических систем.

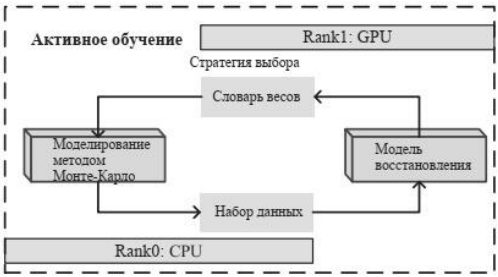


Рис. 1. Структура нейронной сети восстановления изображения

Список литературы

1. Li Y., Niu Z., Sun Q., Xiao H., Li H // Remote Sensing, 2022. V. 14. P. 4852.
2. Jia P., Wang W., Ning R., Xue X. // Optics Express. 2022, V. 30. P. 21362.

УДК 535(06)+004(06)

А.С. ОВЧИННИКОВ, В.В. КРАСНОВ, Д.А. РЫМОВ,
А.В. ШИФРИНА, П.А. ЧЕРЁМХИН, Р.С. СТАРИКОВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ДЕКОДИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОСЕТЕЙ И ПОСТ-ОБРАБОТКИ В ЗАДАЧАХ ОПТИЧЕСКОГО КОДИРОВАНИЯ В ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕКОГЕРЕНТНОМ ИЗЛУЧЕНИИ

Приведены результаты исследования повышения качества взлома оптически закодированных изображений в пространственно-некогерентном излучении на основе нейронных сетей. Получены методы и соответствующие улучшения, обеспечивающие наилучшее качество реконструкции изображения.

A.S. OVCHINNIKOV, V.V. KRASNOV, D.A. RYMOV,
A.V. SHIFRINA, P.A. CHEREMKHIN, R.S. STARIKOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

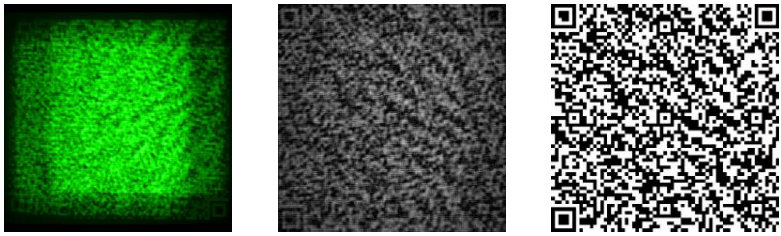
IMPROVING DECRYPTION IMAGE QUALITY USING NEURAL NETWORKS AND POST-PROCESSING IN OPTICAL ENCRYPTION UNDER SPATIALLY-INCOHERENT ILLUMINATION

The results of improving the quality of hacking optically encrypted images in spatially incoherent illumination based on neural networks are presented. The methods and corresponding enhancements that provide the best image quality are obtained.

Создание криптографической системы, удовлетворяющей всем современным требованиям – одна из перспективных задач, имеющая непосредственное практическое значение [1]. К числу способов реализации подобных систем относится использование метода кодирования графической информации на основе преобразования световых полей. Для упрощения аппаратной реализации криптографической схемы и повышения качества декодированных изображений возможен переход от монохроматичного пространственно-когерентного освещения к пространственно-некогерентному [2].

Проведено оптическое кодирование изображения цифрового массива бинарных данных (QR-кода) в пространственно-некогерентном излучении

(рис. 1*а*). Затем обученная на синтезированных данных нейронная сеть (НС) была использована для извлечения ключа кодирования из оптически кодированного изображения. Далее изображение было декодировано при помощи полученного ключа (рис. 1*б*) и бинаризовано. Однако в декодированном изображении QR-кода было много ошибок. Поэтому необходимо разработать способ пост-обработки, который позволит значительно снизить количество ошибок в выходном изображении, а также выбрать лучший метод бинаризации.



а *б* *в*

Рис. 1. Закодированное изображение (*а*), декодированное нейросетью изображение до (*б*) и после обработки (*в*)

Для дальнейшего улучшения качества выходного изображения применялся следующий алгоритм, состоящий из размытия ключа и пороговой обработки. Для выявления лучшей бинаризации исследовались глобальные и локальные методы. Качество восстановления изображения оценивалось по количеству ошибочно определённых пикселей по сравнению с исходным. Количество ошибок исходно декорированного изображения составило 331. Глобальные методы показали результаты до в 2,4 раза (метод Отсу) лучше, а локальные – в 6 раз (метод Брэдли, рис. 1*в*) лучше. Полученное изображение может быть считано стандартным приложением сканнера QR-кода.

Таким образом, совместное использование нейросетевых методов и пост-обработки улучшило качество декодирования изображения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 23-12-00336.

Список литературы

1. Javidi B., Carnicer A., Yamaguchi M., et al. Roadmap on optical security // Journal of Optics. 2016. V. 18. P. 1-39.

2. Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., et al. Lensless optical encryption with speckle-noise suppression and QR codes // Applied Optics. 2021. V. 60 (24). P. 7336-7345.

УДК 535(06)+004(06)

В.В. ГАВРУШКО, О.Р. КАДРИЕВ, В.А. ЛАСТКИН[1]
Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого
[1]АО «ОКБ-Планета», Великий Новгород

КРЕМНИЕВЫЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ФОТОПРИЁМНИКИ: ТЕХНОЛОГИЯ, ХАРАКТЕРИСТИКИ, ПРИМЕНЕНИЕ

Предложено использовать для фотоприёмников дифференциальные методы регистрации сигналов. Такие методы позволяют корректировать спектральную характеристику фотоприёмников, смещая чувствительность в коротковолновую область. Даны примеры возможной реализации таких фотоприёмников на основе кремния. Исследованы их характеристики, показаны варианты возможного использования фотоприёмников как двухцветных.

V.V. GAVRUSHKO, O.R. KADRIEV, V.A. LASTKIN[1]
Yaroslav-the-Wise Novgorod State University
[1]OJSK «Planeta-OKB», Veliky Novgorod

SILICON DIFFERENTIAL PHOTODETECTORS: TECHNOLOGY, CHARACTERISTICS, APPLICATION

It is proposed to use differential signal recording methods for photodetectors. Such methods make it possible to correct the spectral characteristics of photodetectors, shifting the sensitivity to the short-wave region. Examples of possible implementation of such silicon-based photodetectors are given. Their characteristics are studied, options for the possible use of two-color photodetectors are shown.

В микроэлектронных измерительных преобразователях наряду с традиционными находят широкое применение разностные или дифференциальные методы [1, 2]. В настоящей работе рассматривается возможность использования дифференциальной технологии для управления спектральной характеристики кремниевых фотоприёмников. Описаны способы получения фотоприёмников с использованием имплантации ионов As в широком диапазоне доз легирования от 200 до 5000 μQ/cm^2 [3]. Как оказалось, такие фотоприёмники обладают рядом специфических особенностей. Для обеспечения монотонности диаграммы направленности необходимо использовать плоские корпуса. Спектральная чувствительность дифференциального сигнала, полученного вычитанием фототоков, имела ярко выраженную коротковолновую характеристику.

Длинноволновая граница спектрального диапазона этого канала по уровню $\lambda_{0,5}$ в зависимости от дозы легирования изменялась в пределах 0.37 - 0.47 μm (рис. 1). Значения токовой чувствительности дифференциального канала для фотоприёмника с дозой легирования 2000 μQ/cm^2 составили Si = 0.06 А/Вт. Вольтамперные характеристики фотодиодов основного и дополнительного каналов при небольших напряжениях имели похожий вид, не обнаруживая существенной зависимости от дозы легирования [4]. Вблизи нулевого смещения спектральная плотность белого шумового тока на частотах свыше 300…350 Гц имела значение около $1 \cdot 10^{-13}$ А/Гц$^{1/2}$. Пороговые характеристики фотоприёмников для дневного света на частотах свыше 300 Гц определялись флуктуациями фонового излучения, начиная с освещённости около 10 люкс. Области чувствительности дифференциального и дополнительного каналов имели ярко выраженное смещение друг относительно друга в коротковолновую и длинноволновую части спектра (рис. 2). Это позволяет использовать дифференциальные фотоприёмники в качестве двухцветных [5].

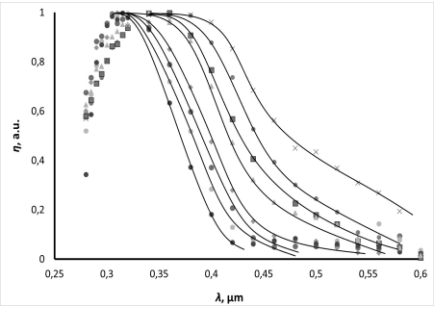


Рис. 1. Спектральная чувствительность дифференциального канала в диапазоне доз легирования от 200 до 5000 μQ/cm^2

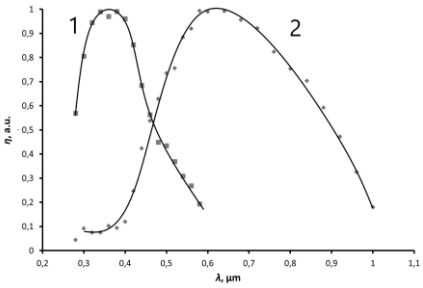


Рис. 2. Спектральные характеристики дифференциального (1) и дополнительного (2) каналов

Список литературы

1. Гурин Н.Т., Новиков С.Г. и др. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37 (6). С. 57.
2. Войцеховский А.В., и др. //Нано и микросистемная техника. 2012. Т. 143 (6), С. 30.
3. Гаврушко В.В., Ионов А.С. и др.// ЖТФ. 2023. Т. 93 (9) С. 1353.
4. Gavrushko V.V., Ionov A.S., Kadriev O.R., et al. // J. Phys.: Conf. Series, 2021. V. 2052. P. 12.
5. Sankin V.I.,. Chelibanov V.P. // Phys. Stat. Sol. A. 2001. V. 185 (1). P. 153.

УДК 535(06)+004(06)

М.А. ГОРЯЕВ
Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург

ВЛИЯНИЕ КРАСИТЕЛЯ НА ФОТОЭДС В КРЕМНИИ n- И p-ТИПА

Исследованы спектры фотоЭДС в кремнии *n*- и *p*-типа с нанесённым на поверхность красителем. В полупроводнике *n*-типа наблюдается спектральная сенсибилизация фотоэффекта, но в образцах *p*-типа краситель оказывает десенсибилизирующее действие.

M.A. GORYAEV
Herzen State Pedagogical University of Russia, Saint-Petersburg

DYE INFLUENCE ON THE PHOTOEMF IN THE n- AND p-TYPE SILICON

The photo-EMF spectra in the *n*- and *p*-type silicon with a dye applied on the semiconconductor surface are investigated. The spectral sensitization of the photovoltaic effect is observed in the *n*-type semiconductor, but a dye has the desensitizatoin effect in the *p*-type samples.

В фотоэлектрических преобразователях солнечной энергии [1] и в ПЗС-матрицах систем регистрации изображений [2] широко используются кремниевые структуры. Органические красители эффективно сенсибилизируют фотопроводимость на постоянном токе в порошкообразном кремнии [3] и фотоЭДС в монокристаллическом кремнии [4]. Но в гетероструктурах краситель оказывает неоднозначное воздействие на спектры фотоэффекта в результате взаимодействия с поверхностью полупроводника [5, 6]. В данной работе исследовались спектры фотоЭДС в монокристаллических образцах кремния с проводимостью *n*-типа, легированных фосфором с концентрацией 10^{15} см$^{-3}$, и с проводимостью *p*-типа, легированных бором с концентрацией 10^{15} см$^{-3}$, и влияние на фотовольтаический эффект нанесённого на поверхность полупроводника органического красителя.

Измерения фотоЭДС образцов проводилось конденсаторным методом [7] при модулированном освещении. Для оценки эффективности внутреннего фотоэффекта измеряемые сигналы ΔU нормировались на одинаковое количество падающих на образец квантов света.

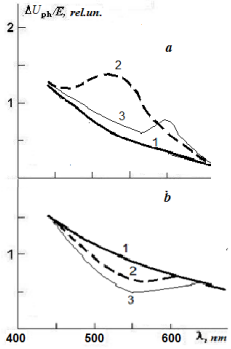


Рис. 1. Спектры фотоЭДС образцов кремния *n*-типа (*a*) и *p*-типа (*b*)

На рис. 1 представлены спектры фотоЭДС образцов кремния *n*-типа (*a*) и *p*-типа (*b*) без красителя (кривые 1) и с нанесённым на полупроводник родамином 6Ж с концентрациями молекул красителя 40 нм$^{-2}$ (кривые 2) и 70 нм$^{-2}$ (кривые 3). Конденсаторная фотоЭДС обусловлена диффузией фотоносителей из-за градиента их концентрации при возбуждении светом [7, 8]. В кремнии подвижность дырок в несколько раз меньше подвижности электронов [8], поэтому основной вклад в изменение фотоЭДС вносят генерированные при передаче энергии от красителя электроны. В исходном кремнии *n*-типа фотоЭДС также обусловлена электронами, поэтому при нанесении красителя наблюдается рост величины ЭДС (кривые 1 и 2). Затем происходит уменьшение сигнала (кривая 3), что связано с проявлением фильтрового эффекта в полосе поглощения красителя [3, 4, 9]. Величина фотоЭДС образцов кремния *p*-типа с самого начала монотонно убывает в полосе поглощения красителя по мере увеличения его концентрации на поверхности полупроводника (кривые 1 – 3). Дополнительная фотоЭДС при передаче энергии фотовозбуждения от красителя определяется электронами. Полярность этой компоненты противоположна фотоЭДС, обусловленной основными носителями кремния *p*-типа, что приводит к десенсибилизирующему действию красителя на фотоэффект.

Автор благодарен Коссову В.Г. и Иванову В.А. за предоставленные образцы кремния.

Список литературы

1. Алферов Ж.И., Андреев В.М., Румянцев В.Д. // Физ. и техн. полупроводников. 2004. Т. 38. № 8. С. 937.

2. Горяев М.А., Дудников Ю.А. // ЖНиПФиК. 1990. Т. 35. № 5. С. 386.

3. Горяев М.А. // Ж. физ. химии. 2015. Т. 89. № 12. С. 1940.

4. Goryaev M.A. // Optics and Spectroscopy. 2019. V. 127. No. 1. P. 167.

5. Горяев М.А. // Сб. научн. трудов: XI Межд. конф. по фотонике и информац. оптике. М.: НИЯУ МИФИ. 2022. С. 239.

6. Горяев М.А. // Сб. научн. трудов: XII Межд. конф. по фотонике и информац. оптике. М.: НИЯУ МИФИ. 2023. С. 234.

7. Акимов И.А. // Оптико-механ. промышл. 1966. № 5. С. 4.

8. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. М.: Наука,1977.

9. Горяев М.А. // Оптика и спектрокопия. 1980. Т. 49. № 6. С. 1142.

УДК 535(06)+004(06)

А.К. АЙМУХАНОВ, Т.Е. СЕЙСЕМБЕКОВА, Н. ТОЛЕГЕН
Карагандинский государственный университет им. Е.А. Букетова, Республика Казахстан

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ZnO В РАЗНЫХ СПИРТОВЫХ РАСТВОРИТЕЛЯХ

В работе представлены результаты исследования влияние спиртов на электронный транспорт ETL-слоя ZnO полимерного солнечного элемента с инвертированной структурой. Солнечные элементы на основе ZnO в Ethanol продемонстрировали значение КПД равное 0,9 % по сравнению с ZnO в Butanol КПД 1,6 %. Показано наименьшая агрегация ZnO наблюдается в Isoproponol, в которой органическая ячейка показала наибольшую эффективность преобразования солнечной энергии в электрическую.

A.K. AIMUKHANOV, T.E. SEISEMBEKOVA, N. TOLEGEN
Buketov Karaganda University, Kazakhstan

PHOTOELECTRIC CHARACTERISTICS OF ZnO IN VARIOUS ALCOHOL SOLVENTS

The paper presents the results of a study of the effect of alcohols on the electronic transport of the ETL layer of a ZnO polymer solar cell with an inverted structure. The ZnO-based solar cells in Ethanol demonstrated an efficiency value of 0.9 % compared to ZnO in Butanol with an efficiency of 1.6 %. It is shown that the smallest aggregation of ZnO is observed in Isoproponol, in which the organic cell showed the highest efficiency of converting solar energy into electrical energy.

ZnO является многофункциональным полупроводником с прямой широкой шириной запрещённой зоны (3,37 эВ для вюрцита ZnO). ZnO обладает довольно высокой энергий связи экситонов (60 МэВ), что делает полупроводник термический и химический стабильным [1]. Однако высокая реакционная способность в воде приводит к быстрому росту кристаллитов ZnO, это затрудняет контроль синтеза частиц нанометрового масштаба. Для предотвращения роста наночастиц ZnO, используют спиртовые растворители [2]. Для получения компактных слоёв ZnO в работе использовали: $Zn_5(OH)_8Cl_2$, Isopropanol, Ethanol, Butanol (pure 99.9 % Sigma Aldrich). Приготовление растворов проводили в соответствии с методикой [3]. Для этого $Zn_5(OH)_8Cl_2$ (навеской m = 49.3 мг) растворяли раздельно в объёме (V = 0.5 мл) в Isopropanol,

Ethanol, Butanol. После растворы отстаивали. В полученные растворы после 20 мин. добавляли моноэтаноламин (Sigma Aldrich) в количестве (V =38 мкл). Далее растворы перемешивали при температуре T = 60 °C в течение 2 ч., а затем выдерживали в течение 24 ч. при комнатной температуре. Для определения влияния спиртовых растворителей на транспорт и рекомбинацию зарядов в ZnO полимерного солнечного элемента была собрана органическая ячейка ZnO/P3HT:ICMA/MoO_3/Ag (рис. 1). Анализ данных показал, что значения плотностей тока короткого замыкания разнятся в зависимости от спиртовых растворителей, так для Isoproponol (Jsc) 8.6, Butanol (Jsc) 7.1 и Ethanol (Jsc) 4.7 mA/cm_2 соответственно. Напряжения холостого хода (Uoc) так же зависит от спиртовых растворителей (табл. 1).

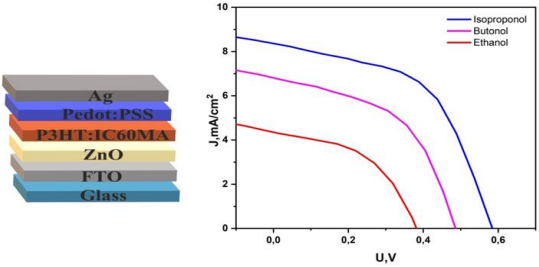


Рис. 1. Структура ячейки (слева), вольтамперная характеристика (справа)

Таблица 1. Фотовольтаические характеристики органических солнечных ячеек

Образец	U_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm^2)	U_{max}(V)	J_{max} (mA/cm^2)	FF	PCE %
Isopropanol	0.58	8.6	0.40	6.33	0.50	2.5
Butanol	0.48	7.1	0.32	5.04	0.47	1.6
Ethanol	0.38	4.7	0.24	3.2	0.43	0.9

В полимерном солнечном элементе с ZnO в Isoproponol из за низкой степени агрегации наблюдается быстрый перенос электронов на катод (FTO) и уменьшение рекомбинации инжектированных электронов на границе с фотоактивным слоем.

Список литературы

1. Motelica L., Ficai D., Oprea O.C., Ficai A., Andronescu E. Smart food packaging designed by nanotechnological and drug delivery approaches // Coatings. 2020. V. 10 (9). P. 806.

2. Spoiala A. Zinc oxide nanoparticles for water purification // Materials. 2021. V. 14. P. 4747.

3. Zhang H., Yao J., Hou J., Zhu J., Zhang J., Li W., Yu R., Gao B., Zhang S., Hou J. Over 14% efficiency in organic solar cells enabled by chlorinated nonfullerene small-molecule acceptors // Advanced Materials. 2018. V. 30 (28). P. 1800613.

В.О. ВЕСЕЛОВА[1], Т.Д. ДУДКИНА, В.Д. ВОЛОДИН[2],
А.В. ЕГОРЫШЕВА[1]

[1]Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
[2]Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Москва
[3]Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва

ТОНКОСЛОЙНЫЙ ДЕТЕКТОР АЛЬФА-ЧАСТИЦ НА ОСНОВЕ $Bi_4Ge_3O_{12}$

Впервые на основе высокодисперсного $Bi_4Ge_3O_{12}$ (BGO) создан тонкослойный сцинтилляционный детектор альфа-излучения. Разработана методика иммобилизации порошка BGO на кварцевой подложке методом импульсного лазерного облучения. Полученные слои ортогерманата висмута по своим спектрально-кинетическим характеристикам существенно превосходят монокристаллические образцы, что обеспечивает лучшее временное разрешение детекторов и делает подобные слои привлекательными для использования в качестве высокочувствительных сцинтилляционных экранов при регистрации альфа-излучения.

V.O. VESELOVA[1], T.D. DUDKINA, V.D. VOLODIN[2],
A.V. EGORYSHEVA[1]

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)
[1]Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of the RAS, Moscow
[2]Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the RAS, Moscow

THIN-FILM ALPHA-PARTICLE DETECTOR BASED ON $Bi_4Ge_3O_{12}$

A novel thin-film alpha scintillation detector has been created based on highly dispersed $Bi_4Ge_3O_{12}$ (BGO). A technique for immobilization of BGO powder on a quartz substrate by pulsed laser irradiation has been developed. The obtained layers of bismuth orthogermanate significantly exceed single crystal samples in their spectral-kinetic characteristics provide better time detectors resolution, which makes them attractive for use as highly sensitive scintillation screens for alpha radiation recording.

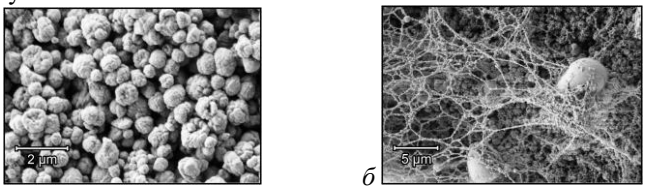
В последние десятилетия одной из важных задач, решаемых с помощью сцинтилляционных детекторов альфа-частиц, является регистрация распада радона. Радиационное воздействие радона и его дочерних продуктов распада на лёгкие атомы представляет существенный вклад в годовую дозу облучения населения и в некоторых регионах является причиной значительного количества онкологических

заболеваний. В связи с этим, актуальной задачей является разработка радиометров для измерения объёмной альфа-активности радона в воздухе помещений, в источниках питьевой воды и других.

Детекторы альфа-излучения в виде экранов с закреплённым на поверхности мелкодисперсным порошком сцинтиллятора выгодно отличаются низкой ценой и возможностью неограниченного наращивания площади чувствительной поверхности от коммерческих полупроводниковых поверхностно-барьерных детекторов прямой регистрации альфа-частиц. В данной работе нами впервые в качестве активного компонента предложено использовать высокодисперсный порошок BGO иммобилизованный на подложке из плавленого кварца.

Порошок BGO синтезировали по предложенной нами ранее [1] экономичной и технически простой методике путём одностадийного процесса соосаждения при комнатной температуре. Синтезированные частицы BGO представляли собой сросшиеся агломераты квазисферической формы размером 0.5 - 0.8 мкм, состоящие из наноразмерных кристаллитов. Разработана методика иммобилизации порошка BGO на кварцевой подложке методом импульсного лазерного облучения. Установлено влияние режима обработки на морфологию и кинетические характеристики сцинтиллятора. Показано, что при лазерной обработке происходит испарение материала кварцевой подложки, что приводит к эффективной иммобилизации частиц BGO без нарушения их стехиометрии (рис. 1). Полученный материал обеспечивает большую стойкость детектора к воздействию влаги и воздуха по сравнению с коммерческими аналогами при сравнимой или более высокой эффективности детектирования.

Полученные сцинтилляционные экраны могут быть использованы для создания малогабаритных сцинтилляционных детекторов радона с высокой чувствительностью.



а *б*

Рис. 1. Слои BGO до (*а*) и после (*б*) иммобилизации

Список литературы

1. Veselova V.O., Gajtko O.M., Volodin V.D., Shafranov M.A., Egorysheva A.V. A one-step synthesis of dispersed bismuth orthogermanate powder and its performance for alpha- and gamma-radiation detection // ChemistrySelect. 2023. V. 8. P. e202204590.

УДК 535(06)+004(06)

Р.Р. КАШИНА, В.В. ДЕМИДОВ[1], Н.В. НИКОНОРОВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург
[1]Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, Санкт-Петербург

НАНОКОМПОЗИТЫ С ДОБАВЛЕНИЕМ КОМБИНАЦИИ Er/Yb ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ТОНКОПЛЁНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ ВНУТРИ ПОЛОГО АНТИРЕЗОНАНСНОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА

Приведены результаты создания нанокомпозитов, легированные ионами Er и Yb для создания тонких плёнок внутри антирезонансного волокна. Такие сложные комбинированные системы необходимы для оптимизации излучения от лазерных систем. Использование антирезонансных волокон в активными плёночными структурами способны усилить оптический сигнал, а также увеличить мощность и дальность передачи световых сигналов.

R.R. KASHINA, V.V. DEMIDOV[1], N.V. NIKONOROV
ITMO University, Saint-Petersburg
[1]S.I. Vavilov State Optical Institute, Saint-Petersburg

Er/Yb DOPED NANOCOMPOSITES COMBINATION FOR THE FORMATION OF THIN FILM COATINGS INSIDE A HOLLOW ANTI-RESONANCE OPTICAL FIBER

Presents the result of creating nanocomposites doped with Er and Yb ions to create thin films inside an antiresonant fiber are presented. Such complex combination systems are necessary to optimize the radiation from laser systems. The use of anti-resonance fibers in active film structures can enhance the optical signal, as well as increase the power and transmission range of light signals.

Одним из нетипичных преимуществ использования полых антирезонансных волокон является возможность заполнения пустот и, в частности, световедущей сердцевины разными растворами и примесями для обеспечения специальной среды и возбуждения активных ионов. Подобная среда способна эффективнее усиливать оптический сигнал, что позволяет их использование как в лазерных системах, так и сенсорных [1].

Целью работы является синтезирование нанокомпозитов, легированные активными ионами эрбия (Er^{3+}) и иттербия (Yb^{3+}) методом М. Печини [2]. Этот метод является разновидностью золь-гель метода и известен как относительно несложный, практичный и недорогой метод

синтеза металлооксидных порошков, в котором полимерный материал подвергается прокаливанию. Образование полимера происходит в результате реакции этерификации между цитратным комплексом металлов и этиленгликолем.

Нанокомпозиты в жидком состоянии позволяют сформировать тонкие плёнки на поверхности образца или внутри, в данном случае внутри антирезонансного волокна. С помощью активированных плёнок возможно эффективнее усиливать оптический сигнал.

В основе данной работы исследовались три порошка нанокомпозитов: YAG:Er/Yb, Y_2O_3:Er/Yb и Gd_2O_3:Er/Yb (рис. 1). Нанокристаллические материалы на основе оксида гадолиния и оксида иттрия демонстрируют хорошие люминесцентные свойства, обладают высокой химической и термической стойкостью [3]. Нанокристаллические материалы алюмоиттриевого граната взяты в качестве референтного значения, так как они давно исследованы. Особенностью данного метода является добавление поливинилпирролидона (ПВП) и лимонной кислоты в качестве стабилизаторов растворов. [4].

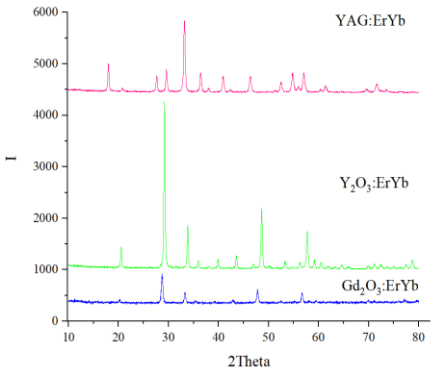


Рис. 1. Дифрактограмма нанокомпозитов YAG:Er/Yb, Y_2O_3:Er/Yb и Gd_2O_3:Er/Yb

Список литературы

1. Матросова А.С. Дисс. канд. физ.-мат. наук. 2022.
2. Sujatha D.P. // In: Handbook of Sol Gel Science & Technology. 2005. V. 3. P. 103-138.
3. Matrosova A.S., et al. // Optical Fiber Technology. 2021. V. 65. P. 102547.
4. Moussaoui A., Bulyga D.V., et al. // Ceramics International. 2021. V. 47 (24). P. 34307.

Д.Р. АБЕУОВ, К.С. РОЖКОВА, А.К. АЙМУХАНОВ
Карагандинский государственный университет им. Е.А. Букетова, Республика Казахстан

ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ WS_2 НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОКОМПОЗИТНЫХ ПЛЁНОК PEDOT:PSS

В работе приведены результаты влияния наночастиц WS_2 на оптические свойства нанокомпозитных плёнок PEDOT:PSS. Установлено, что при добавлении в раствор PEDOT:PSS наночастиц WS_2 происходит уменьшение оптической плотности и наблюдается небольшой батохромный сдвиг максимума поглощения PEDOT.

D.R. ABEUOV, X.S. ROZHKOVA, A.K. AIMUKHANOV
Buketov Karaganda University, Kazakhstan

INFLUENCE OF WS_2 NANOPARTICLES ON OPTICAL PROPERTIES OF PEDOT:PSS NANOCOMPOSITE FILMS

The paper presents the results of the influence of WS_2 nanoparticles on the optical properties of PEDOT:PSS nanocomposite films. It has been found that when WS_2 nanoparticles are added to the PEDOT:PSS solution, the optical density decreases and a small bathochromic shift of the PEDOT absorption maximum is observed.

PEDOT:PSS является предметом огромного количества исследований и используется для ряда направлений в производстве тонкоплёночной электроники. К таким направлениям можно отнести: перовскитные фотоэлектрические элементы PSC, органические фотоэлектрические элементы OSC, органические светоизлучающие диоды, прозрачные проводники, органические электрохимические транзисторы, гибкая электроника и термоэлектрические генераторы [1].

Для создания нанокомпозитной плёнки PEDOT:PSS:NP WS_2 в раствор PEDOT:PSS были добавлены наночастицы в различных концентрациях: от 2 до 10 %.

На рис. 1 представлены спектры поглощения плёнок PEDOT:PSS. Из рис. 1 видно, что плёнка PEDOT:PSS имеет максимум на длине волны λ_1 = 234,6 нм, относящийся к поглощению PEDOT и максимум на 278,2 нм (табл. 1), связанный с поглощением ароматического фрагмента PSS [2].

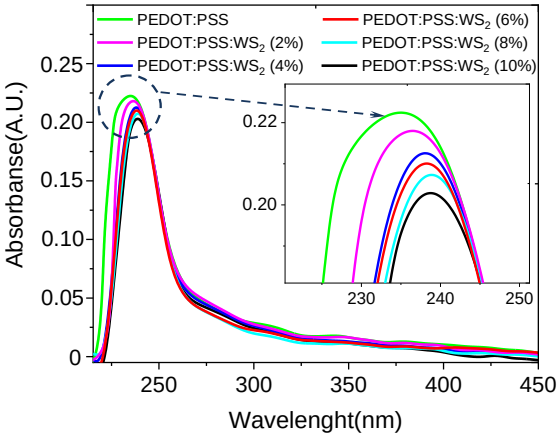


Рис. 1. Спектры поглощения нанокомпозитных плёнок PEDOT:PSS:WS_2

Таблица 1. Спектральные характеристики нанокомпозитных плёнок PEDOT:PSS:WS_2

Образец	λ_1, нм	λ_2, нм
PEDOT:PSS	234,6	278,2
PEDOT:PSS:WS_2 (2%)	236,5	278,2
PEDOT:PSS:WS_2 (4%)	237,9	278,2
PEDOT:PSS:WS_2 (6%)	238,0	278,2
PEDOT:PSS:WS_2 (8%)	238,4	278,2
PEDOT:PSS:WS_2 (10%)	238,9	278,2

При добавлении в раствор PEDOT:PSS наночастиц WS_2 происходит уменьшение оптической плотности и наблюдается небольшой батохромный сдвиг максимума поглощения PEDOT. Наблюдаемый длинноволновый сдвиг максимума поглощения PEDOT:PSS связан с изменением структуры плёнки при встраивании наночастиц WS_2 между цепочками PEDOT и PSS [3].

Список литературы

1. Wu C.-G., Chiang C.-H., et al. // Energy Environ. Sci. 2015. V. 8. No. 9. P. 2725-2733.

2. Rozhkova X.S., Aimukhanov A.K., Ilyassov B.R., et al. // Opt. Mater. 2022. V. 131. P. 112708.

3. Wang Y., Li N., Cui M., et al. // Org. Electron. 2021. V. 99. P. 106305.

УДК 535(06)+004(06)

А.А. КОРНЕЕВА, А.А. БЫКОВ, П.В. ЗИНИН
Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва

ПРИМЕНЕНИЕ АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПЛЁНОК, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО НАПЫЛЕНИЯ

В работе проведён обзор работ по напылению алмазоподобных плёнок и их применение в машиностроении, медицине и микроэлектронике. Представлена установка по лазерному напылению алмазоподобных плёнок, созданная в Научно-технологическом центре уникального приборостроения РАН.

A.A. KORNEEVA, A.A. BYKOV, P.V. ZININ
Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow

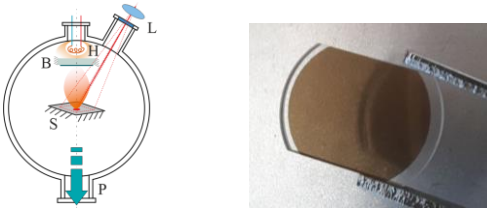
APPLICATION OF DIAMOND-LIKE COATINGS OBTAINED BY LASER DEPOSITION

The work provides a review of work on the deposition of diamond-like films and their application in mechanical engineering, medicine and microelectronics. An installation for laser deposition of diamond-like films, created at the Scientific and Technical Center of the Unique Instrumentation of the RAS, is presented.

В работе произведён обзор работ по лазерному напылению алмазоподобных плёнок и их применение в машиностроении, медицине и микроэлектронике. Так для задач машиностроения напыляются алмазоподобные покрытия, в состав которых входит углерод с примесями серебра, хрома, молибдена, вольфрама, кремния, цинка и золота [1, 2]. Для их получения применяют вакуумные камеры с давлением порядка 10^{-5} мбар, в качестве источников излучения используют эксимерные лазеры с длиной волны 248 нм, а также импульсные лазеры с длиной волны 1064 нм. Полученные плёнки обладают рядом характеристик, которые схожи с характеристиками алмаза: обладают высокой твёрдостью, низким коэффициентом трения, химически стойкие, биологически совместимые. Например, алмазоподобные плёнки с молибденом проявляют устойчивость к царапинам, алмазоподобные плёнки с кремнием обладают высокой износостойкостью, а напыление плёнок с хромом позволяет получить низкий коэффициент трения в совокупности с хорошей адгезией к металлическим подложкам, что важно для задач машиностроения. В медицине кроме высокой износостойкости и адгезии к материалам, применяемым для протезирования, наиболее

важным параметром является биологическая совместимость с тканями организма и антибактериальные свойства. Такую совокупность параметров возможно получать при лазерном напылении чистых алмазоподобных плёнок, а также плёнок с примесями хрома, серебра и кремния [3]. Для задач разработки новых материалов микроэлектроники ключевым параметром является проводимость получаемой плёнки. В связи с этим группами A. Sikora и H. Nakazawa исследовались алмазоподобные плёнки с примесью бора. Полученные данные позволили авторам сделать вывод, что такие плёнки являются проводящими и могут быть использованы в микроэлектронике.

В НТЦ УП РАН была разработана установка [4], позволяющая напылять бор-углеродные соединения (рис. 1*а*) и использовать их для нанесения защитных и проводящих покрытий (рис. 1*б*) на чипы атомно-силовых микроскопов.



а *б*

Рис. 1. Принципиальная схема напыления разработанной установки:
L – фокусирующая система линз; H – нагреватель; B – подложка; S – мишень;
P – система вакуумных насосов (*а*). и плёнка на подложке (*б*)

Работа выполнена в рамках Государственного задания НТЦ УП РАН «Разработка новых методов и средств, для изучения поведения вещества в условиях высоких давлений и температур» (FFNS-2022-0008).

Список литературы

1. Constantinou M., Pervolaraki M., Koutsokeras L., Prouskas C., Patsalas P., Kelires P., Giapintzakis J., Constantinides G. Enhancing the nanoscratch resistance of pulsed laser deposited DLC films through molybdenum-doping // Surf. Coat. Technol. 2017. V. 330. P. 185-195.

2. Nakazawa H., Osozawa R., Okuzaki T., Sato N., Suemitsu M., Abe T. Effects of hydrogen on the properties of Si-incorporated diamond-like carbon films prepared by pulsed laser deposition // Diam. Relat. Mater. 2011. V. 20. P. 485-491.

3. Laporte P. Towards the deposition of tetrahedral diamond-like carbon films on hip joints by femtosecond pulsed laser ablation // Surf. Coat. Technol. 2004. V. 188-189. P. 728-734.

4. Быков А.А., Зинин П.В., Корнеева А.А., Андреев А.В., Белых А.Ю., Краснобородько С.Ю., Ляшенко А.И., Филоненко В.П. Разработка установки импульсного лазерного напыления для получения углеродосодержащих наноплёнок, легированных ионами бора // Физические основы приборостроения. 2022. Т. 11. № 4 (46). С. 24-31.

УДК 535(06)+004(06)

С.Е. ГАНГО[1], К.М. НАГОВИЦЫН[2], С.В. ПАНЬКОВА[1],
В.Г. СОЛОВЬЕВ[1,3]
[1]*Псковский государственный университет*
[2]*ООО «Синтез Технолоджи», ОЭЗ Моглино, Псковская область*
[3]*Военная академия связи им. С.М. Буденного, Санкт-Петербург*

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЭЛЛИПСОМЕТРИИ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СИНТЕТИЧЕСКИХ АЛМАЗОВ

Методом спектральной эллипсометрии исследованы оптические свойства образца синтетического алмаза в видимом диапазоне.

S.E. GANGO[1], K.M. NAGOVITSYN[2], S.V. PAN'KOVA[1],
V.G. SOLOVYEV[1,3]
[1]*Pskov State University*
[2]*Synthesis Technology LLC, Moglino, Pskov region*
[3]*S.M. Budyonny Military Academy of the Signal Corps, Saint-Petersburg*

ON THE POSSIBILITY OF USING SPECTRAL ELLIPSOMETRY IN INVESTIGATIONS OF OPTICAL PROPERTIES OF SYNTHETIC DIAMONDS

The optical properties of a synthetic diamond sample in the visible range have been studied by spectral ellipsometry.

Синтез структурно-совершенных кристаллов алмаза и исследование их оптических свойств является актуальной научно-технической задачей [1]. Эллипсометрия нередко применялась для неразрушающего контроля толщины и морфологии поверхности плёнок синтетических алмазов [2, 3]. Как показывает наш опыт, этот метод, основанный на поляризационных измерениях [4], может быть использован и для изучения спектральных зависимостей оптических характеристик синтетических алмазов.

В настоящей работе с помощью спектроэллипсометра «Эллипс–1891» изучены оптические свойства алмазной пластинки площадью 3×4 мм^2, синтезированной в лаборатории ООО «Синтез Технолоджи» (г. Псков). Спектральные зависимости показателя преломления $n(\lambda)$ и коэффициента экстинкции $k(\lambda)$ синтетического алмаза, полученные в результате обработки результатов эллипсометрических измерений при угле падения

света 70 °, представлены на рис. 1. Как видно из рис. 1, величина n несколько меньше показателя преломления природного алмаза [5]. При этом в коротковолновой области видимой части спектра наблюдается аномальная дисперсия, отвечающая широкой полосе в спектре k(λ), которая может быть связана с присутствием примесных точечных дефектов (атомов азота, замещающих атомы углерода в кристаллической решётке алмаза), собственных дефектов, а также их комплексов [6, 7].

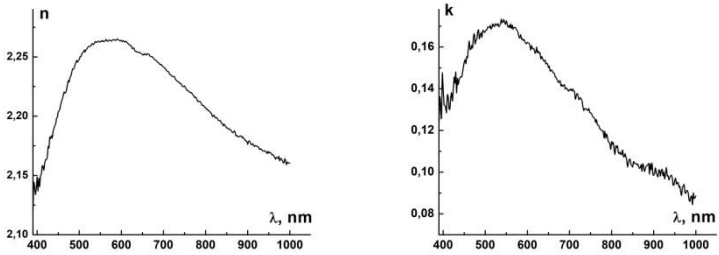


Рис. 1. Спектральные зависимости показателя преломления n(λ) и коэффициента экстинкции k(λ) синтетического алмаза, полученные с помощью эллипсометрических измерений при угле падения света 70 °

Согласие полученных оптических спектров с литературными данными, полученными другими методами, подтверждает возможность успешного использования спектральной эллипсометрии для исследования свойств синтетических алмазов.

Список литературы

1. Мудрый А.В., Ларионова Т.П., Шакин И.А., Гусаков Г.А., Дубров Г.А., Тихонов В.В. Оптические свойства монокристаллов синтетических алмазов // Физика и техника полупроводников. 2004. Т. 3. Вып. 5. С. 538-542.

2. Thomas E.L.H., Mandal S., Ahmed A.-I., Macdonald J.E., Dane T.G., Rawle J., Cheng C.-L., Williams O.A. Spectroscopic ellipsometry of nanocrystalline diamond film growth // ACS Omega. 2017. V. 2 P. 6715-6727.

3. Handbook of Industrial Diamonds and Diamond Films / Ed. by M.A. Prelas, G. Popovici, L.K. Bigelow. NY: Marcel Dekker Inc., 1998.

4. Швец В.А., Спесивцев Е.В., Рыхлицкий С.В., Михайлов Н.Н. Эллипсометрия – прецизионный метод контроля тонкопленочных структур с субнанометровым разрешением // Российские нанотехнологии. 2009. Т. 4. № 3. С. 72-84.

5. Zaitsev A.M. Optical Properties of Diamond: A Data Handbook. Springer, 2001.

6. Бокий Г.Б., Безруков Г.Н., Клюев Ю.А., Налетов А.М., Непша В.И. Природные и синтетические алмазы. М.: Наука, 1986.

7. Макарский И.В. Контроль качества очистки алмазов с помощью спектрофотометра Lambda 950 // Горный журнал. 2012. № 12. С. 74-77.

УДК 535(06)+004(06)

А.В. ВОЙЦЕХОВСКИЙ[1], С.М. ДЗЯДУХ[1], Д.И. ГОРН[1],
С.А. ДВОРЕЦКИЙ[1,2], Н.Н. МИХАЙЛОВ[1,2], Г.Ю. СИДОРОВ[2],
М.В. ЯКУШЕВ[2]

[1]Национальный исследовательский Томский государственный университет
[2]Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск

ВЛИЯНИЕ ПОСТОЯННОЙ ПОДСВЕТКИ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ nB(SL)n – СТРУКТУР НА ОСНОВЕ HgCdTe

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния постоянной подсветки на ВАХ униполярных барьерных структур на основе гетероэпитаксиальных слоёв КРТ со сверхрешёткой в барьерной области в широком диапазоне температур. Проведён анализ объёмной и поверхностной компонент полного тока через структуру в темновом режиме и при воздействии подсветки.

A.V. VOITSEKHOVSKII[1], S.M. DZYADUKH[1], D.I. GORN[1],
S.A. DVORETSKY[1,2], N.N. MIKHAILOV[1,2], G.Yu. SIDOROV[2],
M.V. YAKUSHEV[2]

[1]National Research Tomsk State University
[2]Rzhanov Institute of Semiconductor Physics of Siberian Branch of the RAS, Novosibirsk

EFFECT OF CONSTANT ILLUMINATION ON THE ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF nB(SL)n STRUCTURES BASED ON HgCdTe

The results of experimental studies of the influence of constant illumination on the current-voltage characteristics of unipolar barrier structures based on heteroepitaxial MCT layers with a superlattice in the barrier region in a wide temperature range are presented. An analysis of the volume and surface components of the total current through the structure in the dark mode and under the influence of illumination was carried out.

Униполярные барьерные структуры на основе гетероэпитаксиальных слоёв КРТ n- типа проводимости являются перспективными высокотемпературными детекторами для излучения средней и дальней области ИК-диапазона [1]. Теоретические расчёты показывают, что барьерная часть созданная на основе сверхрешётки с одной стороны препятствует току основных носителей заряда, с другой не ограничивает

перемещение неосновных носителей заряда [2]. На данном этапе внедрению подобных детекторов мешают технологические проблемы, для решения которых необходимо проведение экспериментов с целью подбора оптимальных параметров и оттачивания технологических режимов выращивания данных структур. Работы в этом направлении постоянно проводятся [3 - 5].

Целью работы является экспериментальное исследование влияния постоянной подсветки на ВАХ униполярных барьерных структур на основе гетероэпитаксиальных слоёв КРТ со сверхрешёткой в барьерной области. Для проведения исследований в ИФП СО РАН были изготовлены тестовые nBn-структуры со сверхрешёткой в барьерной области. Содержание Cd в контактном и поглощающем слоях составляет величину x = 0.32. Сверхрешётка сформирована чередующимися между собой барьерами с содержанием CdTe x = 0.75 и ямами с x = 0.04. Толщины соответствующих слоёв 2.5 нм и 10 нм. В процессе выращивания в контактный слой вводилась легирующая примесь в виде атомов индия. Для выделения объёмной компоненты тока и компоненты тока поверхностной утечки на единой подложке изготавливались структуры с различным поперечным сечением, поверхность которых была пассивирована методом атомно-слоевого осаждения слоем Al_20_3, в котором для создания электрических контактов вскрывались окна и проводилось напыление In.

Исследования проводились в широком диапазоне температур от 12 до 300 К при различных уровнях постоянной подсветки, которая выполнялась со стороны подложки структуры. Показано, что влияние постоянной подсветки на ВАХ сохраняется практически до температуры 200 К. По результатам измерений для структур с разным поперечным сечением были выделены объёмная и поверхностная компоненты полного тока через структуру в темновом режиме и при воздействии различных уровней постоянной подсветки. Сделаны выводы о преобладании различных компонент тока в зависимости от температуры структуры, напряжения смещения и уровня постоянной подсветки структур.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-62-10021.

Список литературы

1. Voitsekhovskii A.V., et al. // J. Electron. Mater. 2021. V. 50,
2. Akhavan N.D., et al. // IEEE Trans. Electron. Dev. 2016. V. 63.
3. Izhnin I.I., et al. // Applied Nanoscience. 2020. V. 10.
4. Войцеховский А.В. и др. // Прикладная физика. 2023. № 4.
5. Войцеховский А.В. и др. // Прикладная физика. 2023. № 5.

УДК 535(06)+004(06)

А.К. МУСАБЕКОВА, А.К. АЙМУХАНОВ, А.М. ЖАКАНОВА, А.У. КАБДИЕВА
Карагандинский государственный университет им. Е.А. Букетова, Республика Казахстан

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА НА МОРФОЛОГИЮ И СТРУКТУРУ ПЛЁНОК SnO_2

В данной работе методом термического оксидирования индия были получены плёнки оксида олова (SnO_2). Исследовалось влияние термического отжига на морфологию и структуру оксида олова. Отжиг плёнок проводился в диапазоне температур 300 - 500 ºС. С увеличением температуры отжига наблюдается увеличение размера зерна.

A.K. MUSSABEKOVA, A.K. AIMUKHANOV, A.M. ZHAKANOVA, A.U. KABDIYEVA
Buketov Karaganda University, Kazakhstan

INFLUENCE OF THERMAL ANNEALING ON THE MORPHOLOGY AND STRUCTURE OF SnO_2 FILMS

In this work, tin oxide (SnO_2) films were obtained by the thermal oxidation of indium. The effect of thermal annealing on the morphology and structure of tin oxide was studied. The films were annealed in the temperature range 300 - 500 ºC. With increasing annealing temperature, an increase in grain size is observed.

Подготовка подложек для OSC на основе FTO осуществлялась согласно методике подробно описанной в [1]. Получение плёнок SnO_2 на FTO проводилось термическим испарением дисперсного порошка Sn (Sigma-Aldrich, powder, 99.99 % trace metals basis) в вакууме на установке CY-1700x-spc-2 (Zhengzhou CY Scientific Instruments Co., Ltd). После полученные плёнки подвергались термическому отжигу на атмосфере воздуха при температурах 300 - 500 °С в течение часа с шагом 50 °С.

Толщины плёнок определяли по СЭМ-снимкам поперечного скола плёнки. Среднее значение толщины осаждаемых плёнок составляет $l \sim 80$ нм. В нашем случае как видно из СЭМ-изображений температура отжига плёнок оказывает влияние на морфологию поверхности. При термическом отжиге наблюдается увеличение размеров зёрен.

На рис. 1 показано распределение размеров зёрен в плёнках, отожжённых при разных температурах, полученных по СЭМ-снимкам. Из

рис. 1 видно, плёнка олова имеет типичную поликристаллическую структуру со средним размером зёрен d ~ 40 нм. После проведения термического отжига при T = 300 °C наблюдается увеличение размеров зёрен в плёнке до 50 нм. Дальнейшее повышение температуры отжига приводит к устойчивому росту среднего размеров зёрен в плёнках.

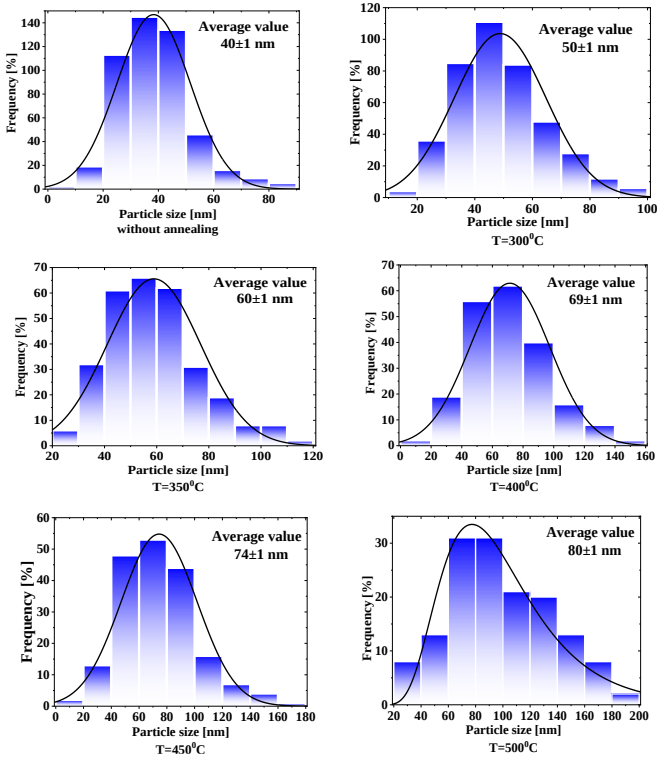


Рис. 1. Распределение частиц в плёнке SnO_2

Возрастание размеров зёрен в плёнке будет способствовать уменьшению рекомбинации зарядов на границе вследствие сокращения плотности дефектов, увеличению подвижности носителей заряда, вследствие чего будет возрастать значение эффективности преобразования световой энергии в электрическую.

Список литературы

1. Chen P., Yin X., // J. Mater. Chem. A. 2017. V. 5 (20). P. 9641-9648.

УДК 535(06)+004(06)

Г.Т. ВАСИЛЮК, П.В. КАРПАЧ, А.А. МАСКЕВИЧ,
Т.С. ГЛЕБОВИЧ, А.О. АЙТ[1], О.В. ВЕНИДИКТОВА[1],
Т.М. ВАЛОВА[1], С.А. МАСКЕВИЧ[2]

Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Беларусь
[1]Центр фотохимии ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва
[2]Международный государственный экологический институт им. А.Д. Сахарова, Белорусский государственный университет, Минск

ЭЛЕКТРОННАЯ СТРУКТУРА РЯДА ФОТОХРОМНЫХ ДИАРИЛЭТЕНОВ

Рассчитаны электронные спектры поглощения (согласующиеся с экспериментальными) ряда фотохромных диарилэтенов, молекулярные орбитали, участвующие в формировании этих спектров, определены и проанализированы их электронные свойства. Выявлены особенности электронной структуры исследованных молекул, что может быть использовано при оптимизации выбора или направленного синтеза фотохромных диарилэтенов с требуемыми свойствами.

G.T. VASILYUK, P.V. KARPACH, A.A. MASKEVICH,
T.S. GLEBOVICH, A.O. AYT[1], O.V. VENIDIKTOVA[1],
T.M. VALOVA[1], S.A. MASKEVICH[2]

Y. Kupala Grodno State University, Belarus
[1]Photochemistry Center of FSRC "Crystallography and Photonics" of the RAS, Moscow
[2]International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, Minsk

ELECTRONIC STRUCTURE OF A PHOTOCHROMIC DIARYLETHENES SERIES

The electronic absorption spectra (corresponding to the experimental ones) of a number of photochromic diarylethenes were calculated, the molecular orbitals involved in the formation of these spectra were determined, and their electronic properties were analyzed. Features of the electronic structure of the studied molecules have been identified, which can be used to optimize the selection or targeted synthesis of photochromic diarylethenes with the required properties.

Фотохромные соединения представляют большой интерес для использования в фотоуправляемых переключателях электрического и оптического сигнала в оптоэлектронных схемах или сенсорах [1, 2]. Термически необратимые диарилэтены (ДАЭ) являются одним из наиболее перспективных классов фотохромных соединений для таких применений. Исследование структуры и электронных свойств таких

соединений позволит проводить направленный синтез молекул, оптимизированных для конкретных востребованных задач.

В настоящей работе методами спектрофотометрии и квантовой химии исследована электронная структура ряда фотохромных диарилэтенов и её фотоиндуцированные изменения. Рассчитаны электронные спектры поглощения ДАЭ и молекулярные орбитали, участвующие в формировании этих спектров. Результаты квантовохимических расчётов согласуются с экспериментальными спектрофотометрическими данными ДАЭ (рис. 1, 2). Проведён анализ граничных молекулярных орбиталей исследованных ДАЭ и на его основе определены и проанализированы их электронные свойства. Выявлены особенности (в сравнении с остальными рассмотренными молекулами ДАЭ) электронной структуры молекулы ДАЭ1 (содержащей атомы фтора), проявляющиеся и в рассчитанных электронных параметрах.

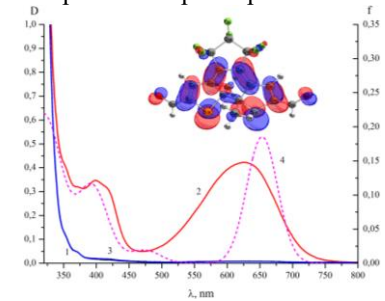


Рис. 1. Спектры электронного поглощения (до (1), после УФ-облучения (2) и после последующего видимого облучения (3)) фотохромного диарилэтена ДАЭ1 в толуоле, расчётные спектры электронного поглощения (4) и формы граничных МО, участвующих в формировании спектра поглощения ДАЭ1

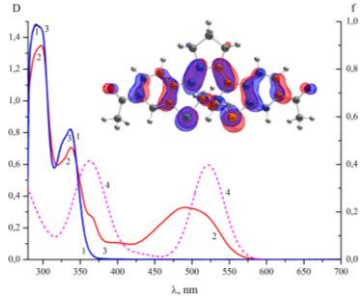


Рис. 2. Спектры электронного поглощения (до (1), после УФ-облучения (2) и после последующего видимого облучения (3)) фотохромного диарилэтена ДАЭ2 в толуоле, расчётные спектры электронного поглощения (4) и формы граничных МО, участвующих в формировании спектра поглощения ДАЭ2

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь (задание 1.5 ГПНИ “Фотоника и электроника для инноваций”) и бюджетном финансировании РФ работ, проводимых в рамках Государственного задания ФНИЦ ”Кристаллография и фотоника“ РАН в части синтеза и анализа спектральных свойств фотохромных систем.

Список литературы

1. Klajn R., Stoddart J.F., Grzybowski B.A. // Chem. Soc. Rev. 2010. V. 39. P. 2203.
2. Vasilyuk G.T., et al. // Optics and Spectroscopy. 2022. V. 130. No. 3. P. 361.

УДК 535(06)+004(06)

А.К. МУСАБЕКОВА, А.К. АЙМУХАНОВ, А.З. ЗИЯТ,
Н.К. МУСАБЕК
Карагандинский государственный университет им. Е.А. Букетова, Республика Казахстан

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА ПЛЁНОК SnO_2 НА ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЛНЕЧНЫХ ЯЧЕЕК

В работе на основе полученных плёнок SnO_2 были собраны инвертированные органические солнечные ячейки (OSCs) со FTO/SnO_2/P3HT:ICMA/PEDOT:PSS/Ag структурой. Проводилось исследование влияния термического отжига на фотовольтаические характеристики OSCs. Отжиг плёнок проводился в диапазоне температур 300 - 500 °C. Показано, что увеличение температуры отжига SnO_2 до 500 °C приводит к значительному улучшению PCE.

A.K. MUSSABEKOVA, A.K. AIMUKHANOV, A.Z. ZIYAT,
N.K. MUSSABEK
Buketov Karaganda University, Kazakhstan

INFLUENCE OF THERMAL ANNEALING PARAMETERS OF SnO_2 FILMS ON THE PHOTOVOLTAIC CHARACTERISTICS OF ORGANIC SOLAR CELLS

In this work, based on the obtained SnO_2 films, inverted organic solar cells (OSCs) with FTO/SnO_2/P3HT:ICMA/PEDOT:PSS/Ag structure were assembled. A study was carried out on the effect of thermal annealing on the photovoltaic characteristics of OSCs. The films were annealed in the temperature range of 300 - 500 °C. It was shown that increasing the SnO_2 annealing temperature to 500 °C leads to a significant improvement in PCE.

Для получения OSC с инвертированной структурой на поверхность плёнки SnO_2 методом spin-coating наносился раствор фотоактивного материала P3HT:ICMA (pure 97 % Sigma Aldrich) в концентрации 1:0.8 при скорости вращения подложки 2000 об/мин. После этого, образованная плёнка фотоактивного слоя, подвергалась термическому отжигу в атмосфере воздуха при температуре 140 °C в течение 10 мин. На заключительном этапе на поверхность фотоактивного слоя затем методом spin-coating (3000 об/мин.) наносился HTL-слой PEDOT:PSS (Sigma Aldrich, d ~ 30 нм) и методом термического осаждения на установке

CY-1700x-spc-2 (Zhengzhou CY Scientific Instruments Co. Ltd) напыляли токосъёмный электрод (Ag, d ~ 120 нм) [1].

Измерения ВАХ фоточувствительных ячеек определяли прибором Sol3A Class AAA Solar Simulators (Newport) with PVIV-1A I-V Test Station. Вольтамперные характеристики OSCs показаны на рис. 1. В табл. 1 приведены фотовольтаические параметры OSCs посчитанные на основе ВАХ. Как видно из рис. 1 и табл. параметры ВАХ зависят от температуры отжига SnO_2. Повышение температуры отжига до T = 500 °C приводит к возрастанию значений токов, напряжения и КПД ячейки.

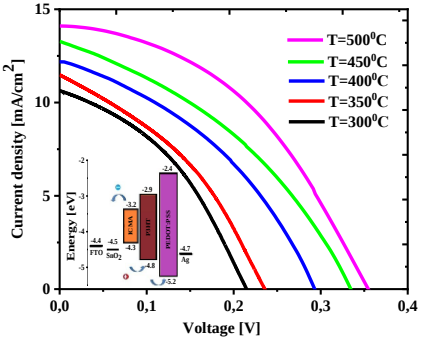


Рис. 1. Влияние температуры отжига SnO2 на вольтамперные характеристики OSCs SnO2/P3HT:ICMA/Pedot:PSS/Ag

Таблица 1. Параметры ВАХ солнечных ячеек

t отжига, °C	U_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm^2)	U_{max}(V)	J_{max} (mA/cm^2)	FF	PCE %
300 °C	0.21	10.5	0.15	6.1	0.42	0.4
350 °C	0.24	11.3	0.17	6.7	0.43	0.5
400 °C	0.29	12.2	0.21	7.3	0.44	0.7
450 °C	0.33	13.3	0.24	8.2	0.46	0.9
500 °C	0.35	14.1	0.26	9.1	0.48	1.1

Наблюдаемые изменения ВАХ ячеек SnO_2/P3HT:ICMA/PEDOT:PSS/Ag связано с влиянием структурных изменений SnO_2 при повышении температуры отжига, которое оказывает влияние на транспорт электронов заряда в OSCs. Увеличение температуры отжига плёнок SnO_2 приводит к повышению PCE OSCs (1.1 %).

Список литературы

1. Ma Q., Zheng H.-M. Atomic-layer-deposition of indium oxide nanofilms for thin film transistors // Nanoscale Res. Lett. 2018. V. 13. P. 1,

УДК 535(06)+004(06)

П.В. КАРПАЧ, Г.Т. ВАСИЛЮК, А.О. АЙТ[1], А.М. ГОРЕЛИК[1], С.А. МАСКЕВИЧ[2]

Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Беларусь
[1]Центр фотохимии ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва
[2]Международный государственный экологический институт им. А.Д. Сахарова, Белорусский государственный университет, Минск

ЭФФЕКТИВНОСТЬ МОДУЛЯЦИИ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ ФОТОХРОМНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК И ХРОМЕНОВ

Исследована фотоиндуцированная модуляция флуоресценции фотохромных нанокомпозитов на основе квантовых точек и хроменов (моно- и бис-). Обнаружено, что эффективность (коэффициент) модуляции интенсивности флуоресценции повышается в случае бис-хроменов.

P.V. KARPACH, G.T. VASILYUK, A.O. AYT[1], A.M. GORELIK[1], S.A. MASKEVICH[2]

Y. Kupala Grodno State University, Belarus
[1]Photochemistry Center of FSRC "Crystallography and Photonics" of the RAS, Moscow
[2]International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, Minsk

EFFECTIVENESS OF FLUORESCENCE MODULATION OF PHOTOCHROMIC NANOCOMPOSITES BASED ON QUANTUM DOTS AND CHROMENES

Photoinduced modulation of fluorescence of photochromic nanocomposites based on quantum dots and chromenes (mono- and bis-) has been studied. It was found that the efficiency (coefficient) of fluorescence intensity modulation increases in the case of bis-chromenes.

Перспективные нанокомпозитные системы, содержащие флуорофор (например, полупроводниковую квантовую точку (КТ)) и фотохромный фрагмент, вследствие фототрансформация фотохромной молекулы демонстрируют фотоиндуцированную модуляцию интенсивности флуоресценции [1]. Бис-фотохромные соединения, в частности, бис-хромены интересны не только как мультистабильные элементы для многопозиционных молекулярных переключателей в устройствах молекулярной электроники [2], но и вследствие потенциальной

возможности повышения эффективности модуляции флуоресценции благодаря повышенной функциональной активности молекул.

В настоящей работе методами стационарной спектрофлуориметрии проведено сравнительное исследование фотоиндуцированной модуляции флуоресценции фотохромных нанокомпозитов на основе квантовых точек CdSe/ZnS и хроменов (3,3-дифенил-3H-бензо[f]хромен-9-ол G618 и бис(3,3-дифенил-3H-бензо[f]хромен-9-ил)-3,3'-дисульфадиилдипропанат G620) (рис. 1 и 2). Выявлено повышение эффективности (коэффициента) модуляции интенсивности флуоресценции (при обратной фотохромной реакции) в случае бис-хроменов, что можно объяснить их повышенной функциональной активностью.

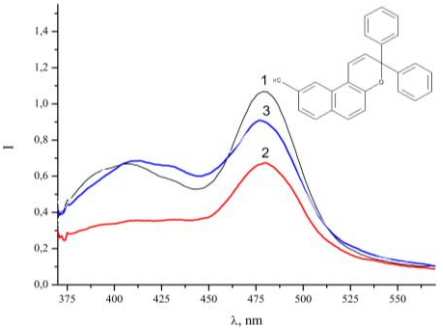


Рис. 1. Спектры флуоресценции (до (1), после УФ-облучения (2) и после последующего видимого облучения (3)) фотохромных нанокомпозитов на основе квантовых точек и дифенилбензохромена G618 в толуоле

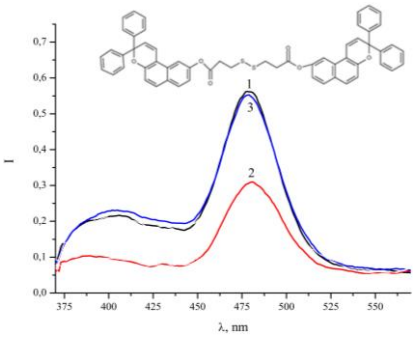


Рис. 2. Спектры флуоресценции (до (1), после УФ-облучения (2) и после последующего видимого облучения (3)) фотохромных нанокомпозитов на основе квантовых точек и бисдифенилбензохромена G620 в толуоле

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь (задание 1.5 ГПНИ "Фотоника и электроника для инноваций") и бюджетном финансировании РФ работ, проводимых в рамках Государственного задания ФНИЦ "Кристаллография и фотоника" РАН в части синтеза и анализа спектральных свойств фотохромных систем.

Список литературы

1. Vasilyuk G.T., et al. // Optics and Spectroscopy. 2022. V. 130. No. 3. P. 361.
2. Ozhogin I.V., et al. // Journal of Molecular Structure. 2020. V. 230. P. 128808.

УДК 535(06)+004(06)

С.К. ТАЖИБАЕВ, М.К. БЕЙСЕМБЕКОВ,
А.А. БОКАНОВА, А.А. БЕРИК
Карагандинский государственный университет им. Е.А. Букетова,
Республика Казахстан

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОЛЩИНЫ ПЛЁНОК МЕТАЛЛОФТАЛОЦИАНИНОВ НА ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Приведены результаты исследования структурных, оптических и электрофизических характеристик плёнок фталоцианина и его металлокомплексов с различной толщиной. Плёнки фталоцианина и его металлокомплексов получены на токопроводящей поверхностью ITO методом термического испарения в вакууме. Показано, что наблюдаемые уширения B и Q полос и гипсохромный сдвиг максимумов в спектрах поглощения связаны центральным атомом.

S.K. TAZHIBAYEV, M.K. BEISEMBEKOV,
A.A. BOKANOVA, A.A. BERIK
Buketov Karaganda University, Kazakhstan

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF METALLOPHTHALOCYANINE FILM THICKNESS ON OPTICAL CHARACTERISTICS

The results of the study of the structural, optical and electrophysical characteristics of phthalocyanine films and its metal complexes with different thicknesses are presented. Films of phthalocyanine and its metal complexes were obtained on a conductive ITO surface by thermal evaporation in vacuum. It is shown that the observed broadening of the bands and the hypsochromic shift of the maxima in the absorption spectra are connected by a central atom.

Фталоцианины в настоящее время являются широко исследуемыми молекулярными полупроводниками, что связано с причинами как прикладного, так и научного характера. Фталоцианин представляют собой крупные ароматические органические соединения, построенные из четырёх изоиндольных звеньев, связанных атомами азота. Фталоцианин химически и термически стабильны, большинство из них являются органическими полупроводниками p-типа и обладают фотопроводимостью, легко образуют упорядоченные тонкие плёнки [1, 2]. Это обуславливает их применение в качестве сред для оптической записи

информации, для изготовления светоизлучающих диодов (LEDs), солнечных ячеек, газовых сенсоров, высокоскоростного датчика магнитного поля [3].

В данной работе методом термического напыления в вакууме получены плёнки фталоцианина и его металлокомплексов с различной толщиной. Как показано на рис. 1, нами изучено влияние толщины плёнок на структурные, оптические свойства металлофталоцианинов.

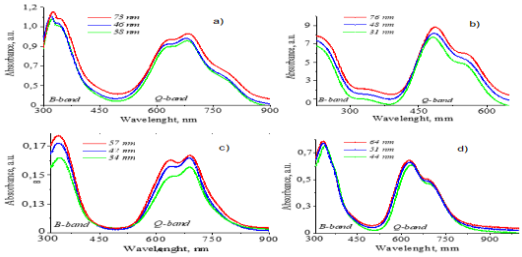


Рис. 1. Спектры поглощения плёнок H2Pc (a), ZnPc (b), CoPc (c) и CuPc (d) с различными толщинами

На рис. 1 приведены спектры поглощения вакуумно-осаждённой плёнок MPc. В спектрах поглощения имеются две интенсивные полосы в области 300 - 450 нм (B-диапазон), которые соответствуют смешанным π-π* и n-π переходам a2u → 2eg и b2u → 2eg, и полоса поглощения в области 550 - 700 нм (Q-диапазон), которая соответствует π-π* переходу a1u → 2eg. Как видно из рис. 1, полоса поглощения плёнок H2Pc, ZnPc и CoPc в области B-диапазона имеет максимум на длине волны λ = 340 нм. В Q-диапазоне также наблюдаются два максимума на длинах волн λ = 630 нм и λ = 690 нм. В свою очередь, для плёнок CuPc в области B-диапазона наблюдается гипсохромный сдвиг максимумов поглощения λ = 227 нм, а также смещение максимумов в Q-диапазоне λ = 485 нм и λ = 553 нм.

Список литературы

1. Yang Y.J., Li S.X., Chen D.L., Long Z.W. Geometric structure, electronic, and spectral properties of metal-free phthalo-cyanine under the external electric fields // ACS Omega. 2022. V. 7. P. 41266.

2. El-Saady A.A., Roushdy N., Farag A.A.M., El-Nahass M.M., Abdel Basset D.M. Exploring the molecular spectroscopic and electronic characterization of nanocrystalline metal-free phthalo-cyanine: a DFT investigation // Opt. Quantum Electron. 2023. V. 55. P. 662.

3. El-Saady A.A., Roushdy N., Farag A.A.M., Ashour A.H., El-Nahass M.M., Abdel Basset D. Influence of Gamma irradiation on the structural, morphological, and optical properties of β-H2Pc // Journal of Electronic Materials. 2023. V. 52. P. 8001-8018.

УДК 535(06)+004(06)

П.А. БЕЗРУКОВ[1], В.В. ПЕСНЯКОВ[1], А.В. НАЩЕКИН[2], А.И. СИДОРОВ[1,3], Н.В. НИКОНОРОВ[1]

[1]Университет ИТМО, Санкт-Петербург
[2]Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
[3]Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

КВАНТОВАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ВОДЫ ФРАКТАЛЬНЫМИ НАНОСТРУКТУРАМИ AgI

В работе исследована квантовая эффективность фотокаталитического разложения воды фрактальными наноструктурами Ag-AgI. Показано, что слои наноструктур, полученные методом химической реакции замещения и последующим частичным йодированием, состоят из фрактальных дендритов. Установлено, что квантовая эффективность разложения воды нелинейно зависит от толщины Ag-слоя наноструктуры и увеличивается при увеличении толщины полупроводникового слоя AgI.

P.A. BEZRUKOV[1], V.V. PESNYAKOV[1], A.V. NASHCHEKIN[2], A.I. SIDOROV[1,3], N.V. NIKONOROV[1]

[1]ITMO University, Saint-Petersburg
[2]Ioffe Physical Technical Institute of the RAS, Saint-Petersburg
[3]Saint-Petersburg State Electrotechnical University «LETI»

PHOTOCATALYTIC QUANTUM EFFICIENCY OF WATER SPLITTING BY FRACTAL AgI NANOSTRUCTURES

In this work, the photocatalytic quantum efficiency of water splitting by fractal Ag-AgI nanostructures was studied. It has been shown that layers of nanostructures obtained by the chemical substitution reaction and subsequent partial iodination consist of fractal dendrites. Quantum efficiency of photocatalytic water splitting nonlinearly depends on the thickness of the Ag layer nanostructure and increases with increasing thickness of the AgI semiconductor layer.

В настоящее время всё более остро встаёт вопрос о повсеместном переходе на возобновляемые источники энергии и, в частности, на водородное топливо. Добычу водородного топлива удобно производить при помощи фотокаталитических реакций, к примеру, используя нанокомпозиты AgI.

В данной работе такие структуры были получены в два этапа: 1) методом замещения из водного раствора $AgNO_3$ на медных подложках были получены нанопористые плёнки Ag (продолжительность 5, 10 и 30 с), 2) йодирование полученных структур в насыщенных парах йода при комнатной температуре. Морфология образцов изучалась с помощью СЭМ JSM 7001 (Jeol).

Для изучения фотоэлектрохимического катализа образцы помещались в водный раствор $NaNO_3$ и облучались волоконным источником УФ- и видимого излучения с приложением к фотокаталитической ячейке напряжения 0,5 - 5 В через балластный резистор 1 кОм.

Квантовая эффективность определялась по формуле [1]: $\eta = N_e/N_{ph}$, где $N_e = I_{ph}\hbar\omega$, $N_{ph} = P_{Abs}e$, N_e – количество фотоэлектронов, N_{ph} – количество поглощённых фотонов, I_{ph} – фототок, P_{Abs} – поглощённая мощность излучения, ω – частота излучения.

Исследования с помощью СЭМ показали, что нанопористые плёнки состоят из дендритов с длиной «ствола» до 6 мкм, «ветвей» до 1 мкм и гексагональных пластинчатых кристаллов размером до 900 нм. На концах «ветвей» расположены наноиглы длиной ~ 50 нм и толщиной 10 - 15 нм (рис. 1). На рис. 2 (время реакция замещения 5 с, время йодирования *1* – 5 мин., *2* – 10 мин., *3* – 20 мин.) видно, что квантовая эффективность повышается при увеличении приложенного напряжения, однако растёт незначительно при увеличении времени йодирования нанопористых структур Ag.

Работа проводилась при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 20-19-00559.

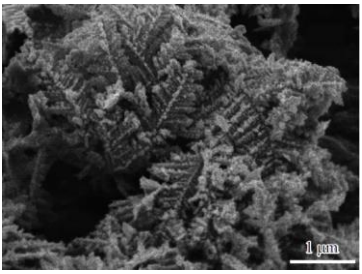


Рис. 1. СЭМ-изображение дендритов AgI

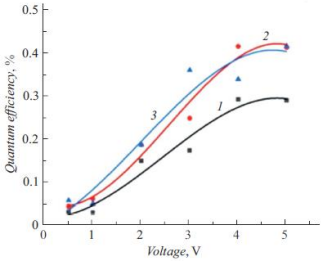


Рис. 2. Зависимость квантовой эффективности от приложенного напряжения при изменении времени йодирования

Список литературы

1. Jiao Y., Chen M., Ren Y., et al. // Optical Materials Express. 2017. V. 7 (5). P. 1557-1564.

УДК 535(06)+004(06)

Д.В. МАРАСАНОВ, В.В. ПЕСНЯКОВ, А.С. САРАТОВСКИЙ,
Е.М. СГИБНЕВ, Н.В. НИКОНОРОВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ БРОМИДА НАТРИЯ НА ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУР Ag-AgBr В ИОНООБМЕННОМ СЛОЕ НАТРИЕВОСИЛИКАТНОГО СТЕКЛА

В работе приведены исследования фотокаталитических свойств наноструктур Ag-AgBr в зависимости от концентрации бромида натрия в составе натриевосиликатного стекла. Увеличение концентрации бромида натрия в стекле приводит к росту среднего размера серебряного ядра наночастиц с 45 до 56 нм. При таком росте выявлен рост величины деградации водного раствора метилового оранжевого красителя с 87 до 92 %.

D.V. MARASANOV, V.V. PESNYAKOV, A.S. SARATOVSKIY,
Yu.M. SGIBNEV, N.V. NIKONOROV
ITMO University, Saint-Petersburg

INFLUENCE OF SODIUM BROMIDE CONCENTRATION ON THE PHOTOCATALYTIC PROPERTIES OF Ag-AgBr NANOSTRUCTIONS IN ION-EXCHANGED LAYERS OF SODIUM SILICATE GLASS

The paper presents studies of the photocatalytic properties of Ag-AgBr nanostructures depending on the concentration of sodium bromide in sodium silicate glass. An increase in the concentration of sodium bromide in glass leads to an increase in the average size of the silver core of nanoparticles from 45 to 56 nm. With such an increase, an increase in the degradation value of an aqueous solution of methyl orange dye was detected from 87 to 92 %.

На сегодняшний день в оптике широко используются натриевосиликатные стёкла, которые можно активировать различными ионами, в том числе серебром. Для применения серебросодержащих стёкол в качестве фотокатализаторов важно наличие максимальной концентрации наноструктур на поверхности, что достигается внедрением ионов серебра с помощью низкотемпературного ионного обмена [1]. Ранее не проводилось подробных исследований о влиянии концентрации брома в составе натриевосиликатного стекле на фотокаталитические свойства

наноструктур Ag-AgBr, получаемых методом Na^+-Ag^+ ионного обмена. Целью работы является исследование фотокаталитических свойств серебряных наноструктур в ионообменном слое силикатного стекла в зависимости от концентрации бромида натрия.

В работе были использованы натриевосиликатные стёкла на основе Na_2O-ZnO-Al_2O_3-SiO_2-F системы, легированной CeO_2, Ag_2O, Sb_2O_3, NaBr (0,51 - 2,1 мол. %). В стекле были синтезированы наноструктуры Ag-AgBr методом ионного обмена (ИО) с последующей термической обработкой при температуре 500°C в течение 3 ч. На каждом этапе измерялись спектры поглощения образцов. Исследование фотокаталитических свойств выполнено путём сравнения спектров поглощения водного раствора метилового оранжевого красителя (1 мг красителя на 100 мл дистиллированной H_2O) при его УФ-облучении без образца и с образцом в кювете. Величина деградации красителя C/C_0 (рис. 1) рассчитана как отношение значений оптической плотности красителя в текущий момент (C) к плотности до начала облучения (C_0) на длине волны 465 нм, соответствующей максимуму оптической плотности для метилового оранжевого красителя [2].

Было показано, что по рентгенофазовому анализу средний размер наночастиц серебра составил от 45 до 56 нм. Величина C/C_0 для водного раствора метилового оранжевого красителя увеличивалась с ростом концентрации бромида натрия и составила 87, 89 и 92 % для образцов с концентрацией бромида натрия 0,51, 0,76 и 2,1 мол. %, соответственно. Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 20-19-00559.

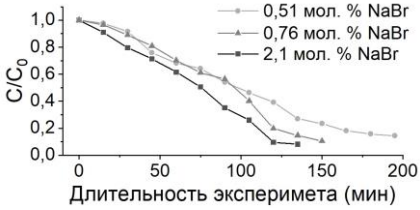


Рис 1. График зависимости C/C_0 водного раствора метилового оранжевого красителя в присутствии полученных фотокатализаторов

Список литературы

1. Sgibnev Yu.M., Marasanov D.V., et al. // Dalton Transactions. 2023. V. 52 (36). P. 12661-12667.

2. Hariani P.L., Said M., et al. // Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis. 2022. V. 17 (4). P. 699-711.

УДК 535(06)+004(06)

В.Г. ШЕРЕМЕТ, А.Н. БАБКИНА, К.С. ЗЫРЯНОВА,
Н.К. КУЗЬМЕНКО
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ОКСИДА БОРА НА СТРУКТУРУ ЩЁЛОЧНО-АЛЮМОБОРАТНЫХ СТЕКЛОКЕРАМИК С ХРОМОМ

Работа посвящена изучению влияния концентрации оксида бора на структуру щёлочно-алюмоборатных стеклокерамик, определённых методом рентгеновского фазового анализа. Установлена связь между составом стеклокерамики и формирующимися кристаллическими фазами, а также люминесцентными свойствами ионов хрома.

V.G. SHEREMET, A.N. BABKINA, K.S. ZYRYANOVA,
N.K. KUZMENKO
ITMO University, Saint-Petersburg

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF BORON OXIDE CONCENTRATION ON THE STRUCTURE OF ALKALI-ALUMINA-BORATE GLASS-CERAMICS WITH CHROMIUM

The work is devoted to studying the effect of boron oxide concentration on the structure of alkali-aluminum borate glass-ceramics, determined by X-ray phase analysis. A relationship has been established between the composition of the glass-ceramics and the forming crystalline phases, as well as the luminescent properties of chromium ions inside of it.

Объектом исследования в работе было щёлочно-алюмоборатное стекло, матрица которого имела следующей состав: $(25 - 0{,}25x)\ Li_2O - (25 - 0{,}25x)\ K_2O - (50 - 0{,}5x)\ Al_2O_3 - xB_2O_3$, где x = 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90 мол. %. Сверх 100 % все составы содержали 0.1 мол. % активатора Cr_2O_3. Исходное щёлочно-алюмоборатное стекло было синтезировано в лабораторной высокотемпературной печи Gero при температуре 1400°C в течение 1,5 ч. Стеклокерамики были синтезированы путём двухступенчатой термообработки исходных стёкол при температуре 450 °C в течение 10 ч. и 600 °C в течение 1 ч. Ранее [1] было показано, что стеклокерамики состава при x = 50 % обладают интенсивной

люминесценцией в области 650 - 750 нм, которая связана с ионами Cr^{3+} в кристаллическом окружении.

Исследование структуры полученных стёкол был проведён методом рентгенофазового анализа. Дифрактограммы были получены на рентгеновском дифрактометре фирмы Rigaku, излучение CuK_α в диапазоне углов от 10 до 80 °. Для подавления CuK_β применялась фольга Ni толщиной 0,02 мм.

Дифрактограммы стеклокерамик с содержанием B_2O_3 от 30 до 40 мол. % демонстрируют наличие кристаллической фазы $(Li_{0,25}Al_{0,75})_2(Li_{0,75}Al_{1,25})_2O_7$ (рис. 1а). При увеличении концентрации оксида бора от 40 до 60 мол. % появляется две фазы $K_2Al_2B_2O_7$ и $Li(Al_7B_4O_{17})$, и вторая является превалирующей [2]. Начиная с концентрации оксида бора 65 мол. % вплоть до 75 мол. % образуется только $Li(Al_7B_4O_{17})$, который трансформируется в $Al_4B_6O_{15}$, когда концентрация B_2O_3 превышает 80 мол. % (рис. 1б).

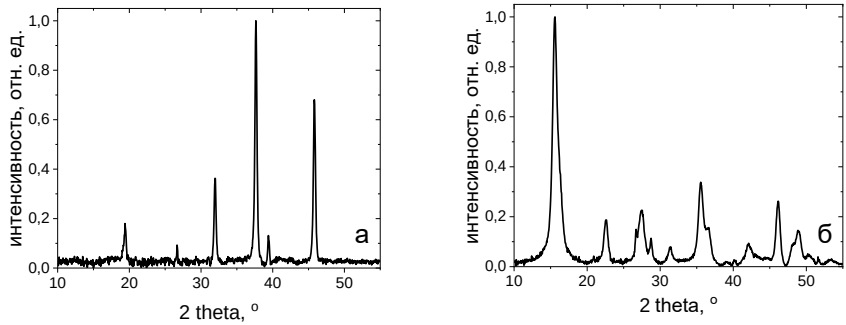


Рис. 1. Дифрактограммы образцов щёлочно-алюмоборатной стеклокерамики с концентрацией B_2O_3 30 мол. % (а) и 85 мол. % (б)

Проведённые исследования люминесцентных свойств показали, что наибольший квантовый выход соответствует составам стеклокерамик с содержанием 30 - 40 мол. % B_2O_3, а наименьший – для составов с 65 - 90 мол. % оксида бора. Это говорит о том, что в кристаллы алюминатов лития ионы хрома встраиваются в высокосимметричное окружение, а в кристаллы боратов алюминия – в низкосимметричное.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (№ 19-72-10036).

Список литературы

1. Valiev D., Babkina A., et al. // J. Non. Cryst. Solids. 2020. V. 534. P. 119947.
2. Kulpina E., et al. // Ceram. Int. 2023. V. 49 (12). P. 20061.

УДК 535(06)+004(06)

Е.А. МИХАРЕВ[1], А.Ю. ЛУНЁВ[1], А.И. СИДОРОВ[1,2]
[1]*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)*
[2]*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

ОПТИЧЕСКИ АКТИВНЫЕ МИКРОСФЕРЫ С МОДАМИ ШЕПЧУЩЕЙ ГАЛЕРЕИ ИЗ СИЛИКАТНОГО СТЕКЛА С МОЛЕКУЛЯРНЫМИ КЛАСТЕРАМИ СЕРЕБРА ДЛЯ ЗАДАЧ СЕНСОРИКИ

Приведены результаты измерений спектра люминесценции и поглощения образцов из силикатного стекла с молекулярными кластерами серебра, полученных методом низкотемпературного ионного обмена. Проведено моделирование микросфер в среде Comsol Multiphysics которое показывает возможность использования микросфер такой конфигурации в качестве оптических датчиков.

E.A. MIKHAREV[1], A.Yu. LUNEV[1], A.I. SIDOROV[1,2]
[1]*Saint-Petersburg State Electrotechnical University «LETI»*
[2]*ITMO University, Saint-Petersburg*

OPTICALLY ACTIVE MICROSPHERES WITH WHISPERING GALLERY MODES FROM SILICATE GLASS WITH SILVER MOLECULAR CLUSTERS FOR SENSORY APLICATIONS

The results of measurements of the luminescence and absorption spectrum of silicate glass samples with molecular silver clusters obtained by low-temperature ion exchange are presented. A simulation of microspheres was carried out in the Comsol Multiphysics environment, which shows the possibility of using microspheres of this configuration as optical sensors.

Микросферы мод шепчущей галереи стали мощными оптическими инструментами, способными обнаруживать разнообразные биологические и химические объекты. И наиболее перспективным направлением в этом направлении является обнаружение без маркеров [1]. В данной работе мы представляем материал для датчиков, основанных на резонаторах с модами шепчущей галереи: микросферы из силикатного стекла, содержащие молекулярные кластеры серебра. Микросферы, синтезированные с использованием процесса низкотемпературного ионного обмена (НИО) [2], демонстрируют интенсивную люминесценцию

в видимом спектре, что даёт возможность для использования их в качестве активных оптических сенсоров в различных областях, включая микрофлюидные системы.

Целью работы является получение микросфер из силикатного стекла, исследование их оптических характеристик.

В процессе НИО образцы микросфер из силикатного стекла погружались в расплав солей $AgNO_3$ и $NaNO_3$ при 330 °C на 15 мин. Спектр люминесценции приведён на рис. 1а, спектр поглощения приведён на рис. 1б. В спектрах люминесценции, возбуждённой на длине волны 370 нм, наблюдаются широкие полосы видимого спектра, что подтверждает образование молекулярных кластеров $Ag_{2...5}$.

Моделирование микросфер в воздухе и воде показывает, что резонансные длины волн основной ТЕ-моды смещаются на 0,25 нм в зависимости от окружающей среды, что подчеркивает потенциал материала для использования в оптических сенсорах.

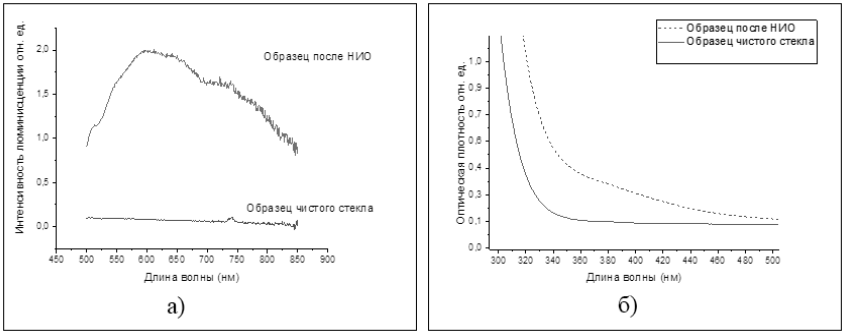


Рис. 1. Спектр интенсивности люминесценции на длине волны возбуждения 370 нм для образца до и после НИО (а), спектр поглощения образца до и после НИО (б)

Список литературы

1. Kim E., Baaske M.D., Vollmer F. Towards next-generation label-free biosensors: recent advances in whispering gallery mode sensors // Lab on a Chip. 2017. V. 17. No. 7. P. 1190-1205.

2. Демичев И.А. Игнатьев А.И., Сгибнев Е.М., Демичев И.А., Никоноров Н.В., Сидоров А.И., Хрущева Т.А., Шахвердов Т.А. Особенности люминесценции силикатных стекол с серебром, введенным методом ионного обмена. // Опт. и Спектр. 2014. Т. 116. № 4. С. 631-637.

УДК 535(06)+004(06)

А.Ю. ЛУНЁВ[1], Е.А. МИХАРЕВ[1], А.И. СИДОРОВ[1,2]
[1]Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
[2]Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОЩНОСТИ НАКАЧКИ НА ДИСПЕРСИЮ В МИКРОСФЕРНОМ РЕЗОНАТОРЕ ИЗ ФОСФАТНОГО СТЕКЛА, ЛЕГИРОВАННОГО Er^{3+}, В БЛИЖНЕЙ ИК-ОБЛАСТИ

Приведены результаты численного моделирования влияния степени инверсии населённости на дисперсию групповой скорости микросферического резонатора с модами шепчущей галереи в ближней ИК-области.

A.Yu. LUNEV[1], E.A. MIKHAREV[1], A.I. SIDOROV[1,2]
[1]Saint-Petersburg State Electrotechnical University «LETI»
[2]ITMO University, Saint-Petersburg

NUMERICAL SIMULATION OF THE INFLUENCE OF PUMP POWER ON DISPERSION OF A PHOSPHATE GLASS MICROSPHERICAL RESONATOR DOPPED WITH Er^{3+} IN THE NIR REGION

The results of numerical simulation of the influence of the degree of population inversion on the group velocity dispersion of a microspherical resonator with whispering gallery modes in the near-IR region are presented.

Благодаря своим уникальным свойствам, таким как малый модовый объём, высокая добротности, низкие потери, микрорезонаторы с модами шепчущей галереи нашли широкое применение в различных областях фотоники [1, 2]. Лазерное излучение в микрорезонаторах реализуется путём введения в микрорезонатор различных активных сред, таких как органические красители, квантовые точки и ионы редкоземельных металлов [3 - 5]. Легирование материала резонатора оказывает влияние на спектр показателя преломления материала микрорезонатора и, соответственно, на его дисперсию. Величина и знак коэффициента усиления/поглощения активных сред зависит и от степени инверсии населённости в среде.

Целью работы является исследование влияния степени накачки микрорезонатора легированного ионами эрбия на дисперсию групповой скорости.

Влияние ионов эрбия на показатель преломления стекла было найдены с использованием соотношения Крамерса–Кронига на основании спектров усиления эрбия при различных степенях инверсии населенности. Для исследования было выбрано стекло с концентрацией ионов эрбия 1×10^{20} см$^{-3}$. Максимальный коэффициент усиления для выбранного стекла составляет 0.79 см$^{-1}$. Моделирование дисперсии микрорезонатора проводилось методом конечных элементов. Для исследования был выбран микрорезонатор диаметром 140 нм. На основании расчётов были получены зависимости дисперсии групповой скорости в ближнем ИК-диапазоне. На рис. 1 приведён спектр люминесценции исследуемого стекла, легированного эрбием, при накачке на длине волны 980 нм. На рис. 2 представлены результаты расчётов дисперсии микрорезонатора при различных уровнях инверсии населенности γ. При увеличении инверсии меняется знак дисперсии за счёт изменения показателя преломления, тип дисперсии меняется с нормальной на аномальную и наоборот. Таким образом, изменяя мощность излучения накачки можно контролировать значение дисперсии в пределах от -29 до 28 пс/(нм·км).

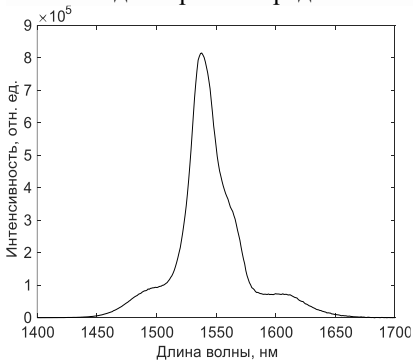


Рис. 1. Спектр люминесценции ионов эрбия в исследуемом стекле

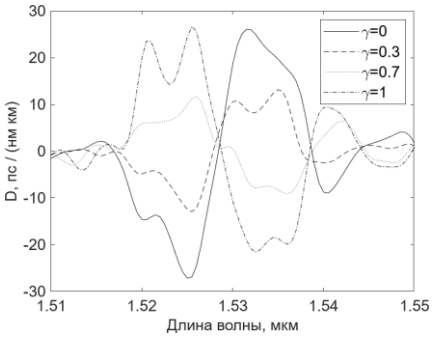


Рис. 2. Результаты расчётов дисперсии микрорезонатора при различных уровнях инверсии населенности γ

Список литературы

1. Chiasera A., et al. //Laser & Photonics Reviews. 2010. V. 4 (3). P. 457-482.
2. Ward J., Benson O. //Laser & Photonics Reviews. 2011. V.5 (4). P. 553-570.
3. He L., Özdemir Ş.K., Yang L. //Laser & Photonics Reviews. 2013. V. 7 (1). P. 60-82.
4. Chen Z., et al. //IEEE Photonics Technology Letters. 2019. V. 31 (20). P. 650-1653.
5. Choi Y.S., et al. //Journal-Korean Physical Society. 2001. V. 39. P. 928-931.

УДК 535(06)+004(06)

Д.В. БУЛЫГА[1,2], С.К. ЕВСТРОПЬЕВ[1,2,3], В.В. ДЕМИДОВ[1], К.В. ДУКЕЛЬСКИЙ[1]

[1]Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, Санкт-Петербург
[2]Университет ИТМО, Санкт-Петербург
[3]Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ОТЖИГА НА ДЕФЕКТНУЮ СТРУКТУРУ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА МЕТОДОМ ЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Приведены результаты экспериментов по исследованию влияния дополнительного отжига на люминесценцию дефектов в кварцевом стекле. Полученные данные свидетельствуют о возможности значительного уменьшения интенсивности люминесценции, связанной с присутствием в кварцевом стекле собственных структурных дефектов.

D.V. BULYGA[1,2], S.K. EVSTROPIEV[1,2,3], V.V. DEMIDOV[1], K.V. DUKELSKII[1]

[1]S.I. Vavilov State Optical Institute, Saint-Petersburg
[2]ITMO University, Saint-Petersburg
[3]Saint-Petersburg State Institute of Technology (Technical University)

STUDY ON THE INFLUENCE OF ADDITIONAL ANNEALING ON THE DEFECT STRUCTURE OF QUARTZ GLASS USING THE LUMINESCENCE SPECTROSCOPY

Presents the result of experiments on the study on the influence of additional annealing on the defect luminescence in quartz glass. The obtained data demonstrates the possibility of significant decrease in the luminescence intensity attributed to intrinsic structural defects in quartz glass.

Люминесцентные методы являются одними из наиболее информативных методов исследования структурных дефектов в кварцевом стекле. В научной литературе (например, [1]) приведены данные о различных дефектах в структуре кварцевого стекла, что позволяет проводить их обоснованную идентификацию.

На рис. 1 приведены спектры фотолюминесценции образцов кварцевого стекла. В спектрах наблюдаются полосы люминесценции

собственных дефектов кварцевого стекла. Так, в области 280 - 295 нм наблюдаются две полосы эмиссии, связанные с центрами дефицита кислорода и образованием дефектных центров -Si-Si-. Полоса люминесценции с максимумом λ_{max} ~ 460 нм приписывается кислородной вакансии в структуре кварцевого стекла [2]. Полоса люминесценции с максимумом λ_{max} ~ 335 нм связана с поверхностными дефектами [3] или изолированными силанольными группами -Si-O-H [2].

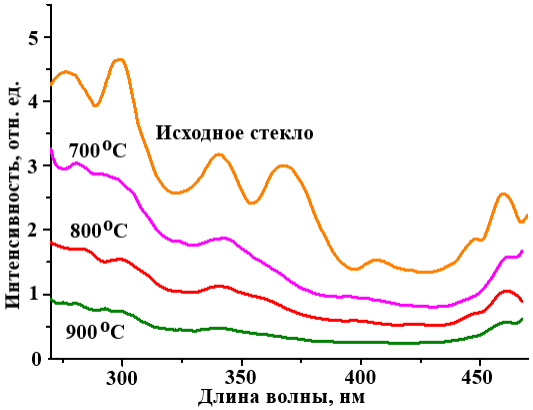


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции исследованных образцов стёкол, подвергнутых дополнительному отжигу, при возбуждении излучением с длиной волны 250 нм

В работе было проведено исследование возможности уменьшения дефектности стекла при проведении его дополнительной термообработки при температурах 700 - 900 °C. Продолжительность отжига при каждой температуре составляла два часа.

Полученные данные свидетельствуют о возможности значительного уменьшения интенсивности люминесценции, связанной с присутствием в кварцевом стекле собственных структурных дефектов.

Список литературы

1. Salh R. Silicon Nanocluster in Silicon Dioxide: Cathodoluminescence, Energy Dispersive X-Ray Analysis, Infrared Spectroscopy Studies, Crystalline Silicon // Properties and Uses. Ed. by S. Basu. InTech. 2011

2. Paleari A., Chiodini N., et al. // Phys. Rev. B. 2005. V. 71. P. 75101.

3. Chiodini N., Meinardi F., et al. // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 76. P. 3209.

УДК 535(06)+004(06)

А.Л. ЛОСИН, А.Н. БАБКИНА, Р.Д. ХАРИСОВА, К.С. ЗЫРЯНОВА, А.Д. ДОЛГОПОЛОВ, М.М. СЕРГЕЕВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГИИ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЮ НАНОКРИСТАЛЛОВ $CsPbI_3$ В БОРОГЕРМАНАТНОМ СТЕКЛЕ

Работа посвящена исследованию люминесцентных свойств перовскитных нанокристаллов $CsPbI_3$, полученных в борогерманатном стекле после облучения фемтосекундным лазером с различными параметрами излучения. Люминесценция наблюдалась в области 670 - 710 нм. Спектры свидетельствуют о смещении в красную область полосы люминесценции из-за размерных эффектов при увеличении энергии лазерного излучения.

A.L. LOSIN, A.N. BABKINA, R.D. KHARISOVA, K.S. ZYRYANOVA, A.D. DOLGOPOLOV, M.M. SERGEEV
ITMO University, Saint-Petersburg

EFFECT OF AEMTOSECOND LASER ENERGY ON LUMINESCENCE OF $CsPbI_3$ NANOCRYSTALS IN BOROGERMANATE GLASSES

The work is devoted to the study of the luminescent properties of $CsPbI_3$ perovskite nanocrystals obtained in borogermanate glass after irradiation with a femtosecond laser with different parameters. The nanocrystals luminescence bands are in 670 - 710 nm region. The spectra show that the increase of laser power leads to red shift of luminescence band because of quantum confinement effect.

Объектом исследования в этой работе стало стекло состава 6,67 ZnO - 5,81 Na_2O - 31,3 B_2O_3 - 50,53 GeO_2 мол. %. Синтез проводился при температуре 950 °C в течение 30 мин. в закрытых кварцевых тиглях. Для последующего выделения нанокристаллов перовскитов $CsPbI_3$ в состав шихты были добавлены $CsCO_3$, PbO и KI. Спектры люминесценции изучались с помощью рамановского микроскопа Renishaw inVia с рабочим диапазоном 100 - 7000 $см^{-1}$ при комнатной температуре с длинами волн возбуждения 633 нм и встроенной линзой 20x. Ранее [1] было показано выделение аналогичных кристаллов в

борогерманатном стекле методом проведения изотермической обработки при температурах выше температуры стеклования состава.

На рис. 1 представлены спектры люминесценции, полученные при различной энергии лазера. Максимум люминесценции лежит в области 680 - 700 нм, а ширина спектра составляет порядка 30 - 40 нм, что характерно для нанокристаллов перовскита $CsPbI_3$ в стекле [2]. По мере уменьшения энергии лазерного излучения спектр люминесценции нанокристаллов смещается от 700 до 680 нм, а ширина увеличивается с 35 до 45 нм. Подобные преобразования спектра люминесценции полупроводниковых кристаллов указывают на наличие размерного эффекта: с увеличением среднего размера квантовых точек спектр люминесценции смещается в длинноволновую область и сужается. Это означает, что с увеличением энергии лазерного воздействия средний размер кристаллов увеличивается. Увеличение энергии лазерного воздействия приводит к увеличению размеров модифицированной зоны стекла и объёма материала, из которого происходит диффузия ионов цезия, свинца и йода для последующего образования кристаллов при охлаждении после лазерного воздействия.

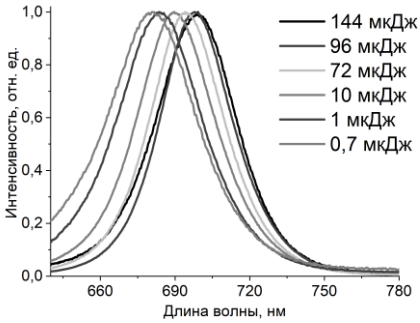


Рис. 1. Спектры люминесценции нанокристаллов $CsPbI_3$ в стекле, полученные после воздействия лазерным излучением с различной энергией

Синтез стекла в рамках этой работы выполнен при финансовой поддержке Российского научного фонда (№ 19-72-10036).

Список литературы

1. Oreshkina K., et al. // Mater. Res. Bull. 2022. V. 149. P. 111720.
2. Xiang X., et al. // Chem. Eng. J. 2019. V. 378. P. 122255.

УДК 535(06)+004(06)

М.Г. КУЧЕРЕНКО, В.М. НАЛБАНДЯН
Оренбургский государственный университет

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК ВБЛИЗИ ПЛАЗМОННЫХ СФЕРОИДАЛЬНЫХ НАНОЧАСТИЦ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Исследовано излучение двухкомпонентной системы «квантовая точка – сфероидальная наночастица» в магнитном поле с учётом диссипации энергии и замагниченности электронной плазмы наночастицы. Обнаружена зависимость структуры спектральных полос люминесценции от эксцентриситета сфероида.

M.G. KUCHERENKO, V.M. NALBANDYAN
Orenburg State University

LUMINESCENCE OF QUANTUM DOTS NEAR PLASMONIC SPHEROIDAL NANOPARTICLES IN A MAGNETIC FIELD

The radiation of a two–component "quantum dot – spheroidal nanoparticle" system in a magnetic field is studied, taking into account the energy dissipation and magnetization of the electron plasma of the nanoparticle. The dependence of the structure of the luminescence spectral bands on the eccentricity of the spheroid is found.

Анизотропная сфероидальная наночастица (НЧ) в однородном электрическом поле напряжённости **E** характеризуется дипольной электрической поляризуемостью, которая представляет собой тензор второго ранга

$$\ddot{\alpha}(\omega\,|\,\mathbf{B}) = \frac{ab^2}{3}\left[\ddot{\varepsilon}(\omega\,|\,\mathbf{B}) - \varepsilon_2\ddot{\mathbf{I}}\right]\left[\varepsilon_2\left(\ddot{\mathbf{I}} - \ddot{\mathbf{n}}\right) + \ddot{\mathbf{n}}\ddot{\varepsilon}(\omega\,|\,\mathbf{B})\right]^{-1}, \qquad (1)$$

где ε_2 и $\ddot{\varepsilon}(\omega\,|\,\mathbf{B})$ – скалярная и тензорная диэлектрические проницаемости окружающей среды и металла замагниченной сфероидальной НЧ соответственно, $\ddot{\mathbf{I}}$ – единичный тензор, $\ddot{\mathbf{n}}$ – тензор деполяризации сфероида, a и b – полуоси сфероида. Наведённый дипольный момент НЧ определён через (1): $\mathbf{P}(\omega) = \ddot{\alpha}(\omega|\mathbf{B})\mathbf{E}$. Зависимости компонент $n_{(x,y,z)}$ тензора $\ddot{\mathbf{n}}$ от эксцентриситета $e = \sqrt{1-b^2/a^2}$ в случае вытянутых сфероидов имеют вид: $n_x = n_y = (1-n_z)/2$, $n_z = (e^{-2}-1)\{1/(2e)\ln[(1+e)/(1-e)]-1\}$.

Интенсивность люминесценции на частоте ω определяется спектральной плотностью N числа фотонов [1, 2], испущенных объединённой системой «квантовая точка – сфероидальная наночастица»

$$N(\omega\,|\,\mathbf{B},\mathbf{r}_0)=\frac{1}{2\pi}\cdot\frac{w_{sp}^2(\omega\,|\,\mathbf{B},\mathbf{r}_0)\left[w_{sp}(\omega\,|\,\mathbf{B},\mathbf{r}_0)+U(\omega\,|\,\mathbf{B},\mathbf{r}_0)+K\right]}{(\omega-\omega_{if})^2+\left[w_{sp}(\omega\,|\,\mathbf{B},\mathbf{r}_0)+U(\omega\,|\,\mathbf{B},\mathbf{r}_0)+K\right]^2}, \qquad (2)$$

где ω_{if} – резонансная частота лоренцева контура полосы люминесценции квантовой точки (КТ) без НЧ, K – скорость безызлучательного распада возбуждённой КТ в отсутствие НЧ, U – скорость безызлучательной передачи энергии от КТ к НЧ, w_{sp} – скорость спонтанного испускания системы.

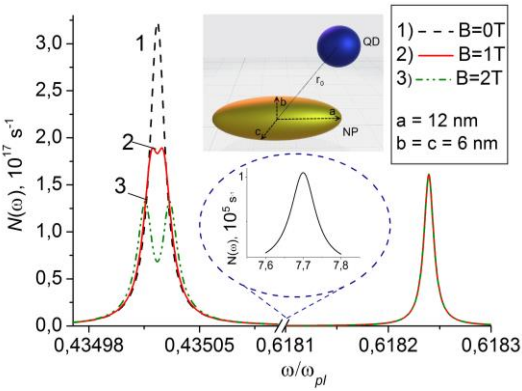


Рис. 1. Спектр люминесценции комплекса
«квантовая точка – сфероидальная наночастица»

В спектре люминесценции (рис. 1), рассчитанном на основе (2), наблюдаются три спектральные полосы: центральная, на частоте ω_{if}, обусловленная резонансным переходом в КТ, и две боковые, отвечающие вкладам в излучение плазмонных мод сфероидальной НЧ. Высокочастотная плазмонная полоса является немагниточувствительной, в отличие от низкочастотной. При ориентациях вектора напряжённости электрического поля излучения вдоль одной из осей сфероида, из двух боковых плазмонных резонансов, остается только один.

Список литературы

1. Кучеренко М.Г., Налбандян В.М. // Опт. и спектроск. 2020, Т. 128. Вып. 11. С. 1778.
2. Кучеренко М.Г., Налбандян В.М., Чмерева Т.М. // Оптич. журн. 2021. Т. 88. № 9. С. 9.

УДК 535(06)+004(06)

С.Р. РОЗЕНТАЛЬ, Н.С. БАБИЧ[1], Д.А. КИСЛОВ
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный
[1]Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ОПТОМЕХАНИКА НАНОЧАСТИЦ В ГИБРИДНОМ АНАПОЛЬНОМ СОСТОЯНИИ

В работе изучено оптомеханическое взаимодействие Гауссова пучка с кремниевой цилиндрической наночастицей, находящейся в гибридном анапольном состоянии (ГАС). Была применена методика мультипольного разложения поляризационного тока для исследования рассеяния частицы в зависимости от её геометрических параметров. Также были рассчитаны оптические силы, действующие на частицу в зависимости от её положения относительно пучка. В работе показано, что в анапольном состоянии сила давления уменьшается до 10 раз, а вращательный момент сил может менять знак.

S.R. ROZENTAL, N.S. BABICH[1], D.A. KISLOV
Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny
[1]ITMO University, Saint-Petersburg

OPTOMECHANICS OF NANOPARTICLES IN THE HYBRID ANAPOLE STATE

This report analyzes the optomechanical interaction of a Gaussian beam and a silicon cylindrical nanoparticle in a hybrid anapole state. The multipole decomposition of the polarization current was performed to study the scattering of a particle depending on its geometric parameters. The optical forces acting on the particle depending on its position relative to the beam were also calculated. The report shows that in the anapole state, the pressure force decreases up to 10 times, and the torque can change sign.

Явление механического воздействия света на различные объекты [0] нашло широкое применение в науке и технике и легло в основу изобретения оптических пинцетов, которые активно используются в биологии [0], физике и химии. При взаимодействии света с частицей можно выделить две компоненты сил. Сила давления вызвана передачей импульса волны объекту и толкает его вдоль направления распространения света, а градиентная составляющая, возникающая из-за неоднородного распределения амплитуды интенсивности света вдоль профиля волны, втягивает частицу в область максимальной интенсивности [0].

Целью данной работы является исследование влияния гибридного анапольного состояния (ГАС) [0] на соотношение силы давления и градиентной силы, действующих на частицу. Мы рассматриваем взаимодействие цилиндрической кремниевой частицы (r = 190 нм, h = 535 нм) с линейно поляризованным сфокусированным гауссовым пучком (рис. 1).

Было проведено численное моделирование в программе COMSOL Multiphysics для анапольного состояния (λ_0 = 750 нм) и неанапольного состояния (λ_1 = 770 нм). Мы показали, что в ГАС величина силы давления уменьшается на порядок (рис. 2). Также было исследовано вращение наночастицы вокруг оси **y** и крутящие моменты, возникающие в этой системе. В неанапольной системе существует только одно положение равновесия, когда ось цилиндра совпадает с направлением луча. А в ГАС появляется дополнительное положение $\alpha = 40$ °, когда вращательный момент меняет знак, что свидетельствует о существовании двух положений равновесия.

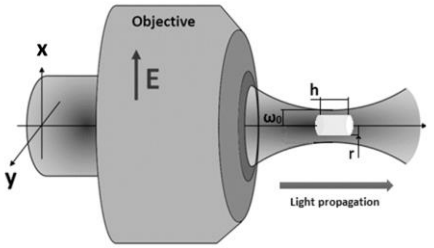


Рис. 1. Цилиндрическая частица в перетяжке гауссова пучка

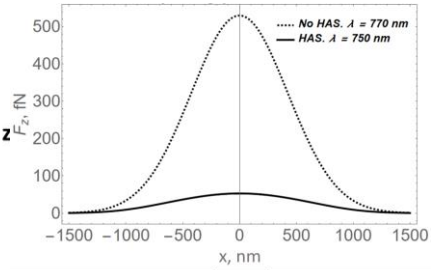


Рис. 2. Зависимость силы давления от координаты x частицы

Список литературы

1. Ashkin A., Dziedzic J.M., Bjorkholm J.E., Chu S. Observation of a single-beam gradient // Opt Lett. 1986. V. 11 (5). P. 288.

2. Liu X., et al. All-optical targeted drug delivery and real-time detection of a single cancer // Nanophotonics. 2020. V. 9. P. 611,

3. Kislov D., Novitsky D., Kadochkin A., Redka D., Shalin A.S., Ginzburg P. Diffusioninspired time-varying phosphorescent decay in a nanostructured environment // Phys. Rev. B. 2020. V. 101. P, 035420.

4. Canós Valero A., Gurvitz E.A., Benimetskiy F.A., et al. Theory, observation, and ultrafast response of the hybrid anapole regime in light scattering // Laser Photonics Rev. 2021. V. 15.

УДК 535(06)+004(06)

А.В. ПАЛЕХОВА, А.Г. БОНДАРЕНКО, Д.В. КОНОНОВ,
Т.А. ВАРТАНЯН, Д.Р. ДАДАДЖАНОВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ И РАЗМЕРА НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА И ЗОЛОТА НА ПЛАЗМОННО-УСИЛЕННУЮ ХЕМИЛЮМИНЕСЦЕНЦИЮ ЛЮМИНОЛА

Было изучено влияние формы и размера наночастиц серебра и золота на хемилюминесцентные свойства люминола. Формирование металлических наночастиц осуществлялось методами коллоидного синтеза и импульсной лазерной абляции в жидкости. Были установлены зависимости концентрации металлических наночастиц от интенсивности хемилюминесценции люминола при различных pH. Показано, что в присутствие металлических наночастиц серебра и золота различной формы наблюдается увеличение интенсивности хемилюминесценции.

A.V. PALEKHOVA, A.G. BONDARENKO, D.V. KONONOV,
T.A. VARTANYAN, D.R. DADADZHANOV
ITMO University, Saint-Petersburg

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE SHAPE AND SIZE OF SILVER AND GOLD NANOPARTICLES ON PLASMON-ENHANCED CHEMILUMINESCENCE OF LUMINOL

The influence of the shape and size of silver and gold nanoparticles on the chemiluminescent properties of luminol was studied. The formation of metal nanoparticles was carried out by colloidal synthesis and pulsed laser ablation in liquid. The dependences of the concentration of metal nanoparticles on the intensity of luminol chemiluminescence at various pH levels were established. It has been shown that in the presence of metallic silver and gold nanoparticles of various shapes, an increase in the intensity of chemiluminescence is observed.

Плазмон-усиленная хемилюминесценция – оптический эффект, при котором наблюдается увеличение квантового выхода хемилюминесценции при взаимодействии молекул хемилюминофоров с наночастицами благородных металлов [1, 2]. Было обнаружено, что люминол, широко используемая хемилюминесцентная молекула, демонстрирует усиленное

излучение в непосредственной близости от наночастиц металлов [3], особенно серебра и золота. Однако влияние формы и размера наночастиц на усиление хемилюминесценции люминофора остается в значительной степени неизученным. Целью данного исследования является изучение влияния формы и размера наночастиц серебра и золота на усиление хемилюминесценции люминола.

Наночастицы серебра и золота различной формы были синтезированы с использованием метода лазерной абляции [4], а также химическим способом. Полученные наночастицы добавляли в растворы люминола, меняя концентрацию первых, затем смешивая с раствором пероксида водорода, регистрировали интенсивность хемилюминесценции с помощью счётчика фотонов.

Результаты показывают, что эффективность хемилюминесценции люминола значительно повышается в присутствии наночастиц серебра и золота, причём максимальное повышение наблюдается для сферических наночастиц серебра с концентрацией 10^{-6} при pH = 5. Мы также обнаружили, что эффект усиления снижается у наночастиц серебра в форме стержней, а также у сферических золотых частиц.

Наблюдаемое усиление хемилюминесценции можно объяснить локализованным поверхностным плазмонным резонансом наночастиц, который усиливает падающий свет и увеличивает время жизни люминола в возбуждённом состоянии. Размер и форма наночастиц влияют на данный процесс, причём сферические наночастицы демонстрируют наилучшее усиление хемилюминесценции. Результаты также показывают, что концентрация наночастиц играет решающую роль в достижении оптимальной эффективности усиления хемилюминесценции.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 23-72-00045.

Список литературы

1. Aslan K., Geddes C.D. // Chem Soc Rev. 2009. V. 38. No. 9. P. 2556.
2. Yu W., Zhao L. // TrAC Trends in Analytical Chemistry. 2021. V. 136. P. 116197.
3. Dadadzhanov D.R., et al. // Sens Actuators B Chem. 2021. V. 333. P. 129453.
4. Дададжанов Д.Р. и др. // Оптика и спектроскопия. 2023. Т. 131. № 7. С. 1011.

УДК 535(06)+004(06)

Т.М. ЧМЕРЕВА, М.Г. КУЧЕРЕНКО, Ф.Ю. МУШИН
Оренбургский государственный университет

СПАЗЕР НА ОСНОВЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ НАНОПРОВОЛОКИ С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СЕРДЕЧНИКОМ И ПЛАЗМОННОЙ ОБОЛОЧКОЙ

Теоретически исследована динамика спазера, представляющего собой нанопроволоку круглого сечения с диэлектрическим сердечником и плазмонной оболочкой, окруженную квантовыми точками. Обнаружено влияние толщины оболочки на число генерируемых одномерных осесимметричных поверхностных плазмон-поляритонов и инверсию населенностей активной двухуровневой среды.

T.M. CHMEREVA, M.G. KUCHERENKO, F.Yu. MUSHIN
Orenburg State University, Russia

SPASER BASED ON A CYLINDRICAL NANOWIRE WITH A DIELECTRIC CORE AND A PLASMON SHELL

The dynamics of a spaser, which is a cylindrical nanowire with a dielectric core and a plasmonic shell surrounded by quantum dots, has been theoretically investigated. The influence of the shell thickness on the number of generated one-dimensional axisymmetric surface plasmon-polaritons and the population inversion of the gain two-level medium was found.

В данной работе рассмотрен спазер, генерирующий одномерные осесимметричные поверхностные плазмон-поляритоны (ППП). Спазер состоит из цилиндрической нанопроволоки с диэлектрическим сердечником и плазмонной оболочкой. Активная среда представляет собой тонкий слой квантовых точек (КТ), окружающий нанопроволоку. Динамика спазера исследована в рамках полуклассической теории [1], основанной на уравнениях Максвелла–Блоха и квантовом описании усиливающей среды, как двухуровневой системы. В оболочечной нанопроволоке могут существовать два типа ППП: низко- и высокочастотные. Однако резонанс в рассматриваемой системе обеспечивают только низкочастотные осесимметричные ППП. Как известно [1], динамика спазера определяется соотношением между релаксационными параметрами системы: скоростью γ_0 затухания плазмонной моды, скоростью γ безызлучательной передачи энергии от КТ к нанопроволоке и скоростью Γ поперечной релаксации КТ.

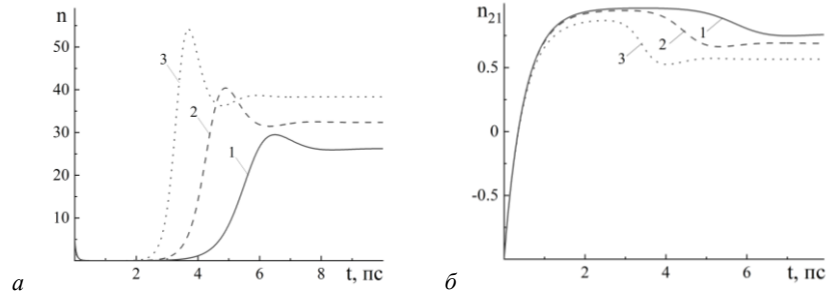
В рамках квантовомеханической теории возмущений для скорости γ было получено следующее выражение

$$\gamma = \frac{4d_{12}^2\omega_0(k_0)Z^2(R_1,R_2)K_0^2(q_3(R_2+\Delta R))}{\hbar S_0(k)}\left|\frac{d\omega_0(k)}{dk}\right|_{k=k_0}^{-1},$$

где d_{12} – дипольный момент перехода в КТ, $\omega_0(k)$ – частота ППП, $S(k_0)$ – площадь локализации плазмонной моды, k_0 – продольное волновое число, обеспечивающее равенство энергий низкочастотного плазмона и возбуждённой КТ, $K_0(x)$ – функция Макдональда нулевого порядка, R_1 и R_2 – внутренний и внешний радиусы металлической оболочки нанопроволоки, $Z(R_1,R_2)$ – множитель, определяющий амплитуду поля плазмона, ΔR – расстояние от КТ до поверхности нанопроволоки, q_3 – поперечное волновое число ППП вне нанопроволоки.

Расчёты, выполненные для нанопроволоки с серебряной оболочкой, дают для скорости γ значение $\sim 10^{10}$ - 10^{11} $с^{-1}$. Поскольку типичная скорость $\Gamma \sim 10^{14}$ $с^{-1}$, и скорость γ_0 для серебра $\sim 10^{12}$ $с^{-1}$, то рассматриваемый спазер относится к классу В, и исследование его динамики производилось на основе скоростных уравнений для инверсии населенностей и числа плазмонов [1]. На рис. 1 представлена динамика спазера, с ростом радиуса сердечника нанопроволоки число генерируемых осесимметричных поверхностных плазмонов увеличивается, а инверсия населенностей усиливающей среды уменьшается.

Исследование выполнено при поддержке Минобрнауки РФ, проект № FSGU-2023-0003.



а *б*

Рис. 1. Временные зависимости числа генерируемых плазмонов (*а*) и инверсии населенностей (*б*) при разных радиусах сердечника нанопроволоки R_1 = 5(1), 10(2), 15(3) нм, внешний радиус нанопроволоки R_2 = 20 нм

Список литературы

1. Нечепуренко И.А., Дорофеенко А.В., Лозовик Ю.Е. // Журнал радиоэлектроники. 2015. № 12. С. 1.

УДК 535(06)+004(06)

Е.Р. ЖИВАГО, А.А. ПЛЕХАНОВ, А.А. ЧИСТЯКОВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРАГЕРЦОВЫХ СПЕКТРОВ ОТРАЖЕНИЯ АЗОТСОДЕРАЖЩИХ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В ЧАСТОТНЫХ ОБЛАСТЯХ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ ПОЛОС ПОГЛОЩЕНИЯ

В настоящей работе на основе метода матриц переноса проведено математическое моделирование терагерцовых (ТГц) спектров отражения азотосодержащих органических соединений RDX (1,3,5-тринитро-1,3,5-триазациклогексан) и PETN (пентаэритрита тетранитрат), образцы которых представляют собой слои толщиной 1 - 100 мкм. Для указанных образцов рассматривались как диэлектрические, так и металлические плоские подложки. Показано, что для углов падения ТГц-излучения на поверхность образцов 0 - 60 ° в случае как p-, так и s-поляризации наблюдаются спектральные особенности в частотных областях характеристических полос поглощения ~ 0,8 ТГц (для RDX) и ~ 2 ТГц (для PETN) в виде локальных минимумов или локальных максимумов, позволяющих по их наличию идентифицировать такие вещества.

E.R. ZHIVAGO, A.A. PLEKHANOV, A.A. CHISTYAKOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

MATHEMATICAL MODELING OF TERAHERTZ REFLECTION SPECTRA OF NITRO-ORGANIC COMPOUNDS IN FREQUENCY REGIONS OF CHARACTERISTIC ABSORPTION BANDS

In this work, based on the method of transfer matrices, mathematical modeling of the terahertz (THz) reflectance spectra of nitrogen-containing organic compounds RDX and PETN, samples of which are 1-thick layers, was carried out. 100 microns. In this case, both dielectric and metal flat substrates were considered for these samples. It is shown that for angles of incidence of THz radiation on the surface of samples of 0 - 60 °, both in the case of p- and s-polarization, spectral features are observed in the region of ~ 0.8 THz (for RDX) and ~ 2 THz (for PETN) in the form of local minima or local maxima, which make it possible to identify such substances by their presence.

Терагерцовое (ТГц) излучение с частотным диапазоном 0,3 - 10 ТГц является неионизирующим и применяется в настоящее время во многих направлениях научной и практической деятельности. Его используют для

исследований физических процессов в молекулярных средах в фармацевтической и химической промышленности [1], при разработке тонкоплёночных сенсоров [2], в биоинженерии [3] и других. ТГц-спектры поглощения изомеров сложных органических молекул во многих случаях оказываются очень чувствительными к изменению их структуры, включая различия функциональных групп и химических связей. За счёт этого ТГц-радиовидение со спектральным разрешением [4], а также ТГц-спектроскопия во временной области могут использоваться как эффективные методы для обнаружения и молекулярной идентификации в области биологии, медицины и фармации [5, 6].

В настоящей работе на основе метода матриц переноса проведено математическое моделирование терагерцовых спектров отражения азотосодержащих органических соединений RDX (1,3,5-тринитро-1,3,5-триазациклогексан) и PETN (пентаэритрита тетранитрат), образцы которых представляют собой слои толщиной 1 - 100 мкм. При этом для указанных образцов рассматривались как диэлектрические, так и металлические плоские подложки. Для вычислений использовались известные показатели преломления и коэффициенты поглощения изучаемых веществ в частотных диапазонах их характеристических полос поглощения (~ 0,8 ТГц для RDX и ~ 2 ТГц для PETN) [7]. Результаты показали, что для углов падения ТГц-излучения на поверхность образцов 0 - 60 ° в случае как p-, так и s-поляризации наблюдаются спектральные особенности в области ~ 0,8 ТГц (для RDX) и ~ 2 ТГц (для PETN) в виде локальных минимумов или локальных максимумов, позволяющих по их наличию идентифицировать эти вещества.

Таким образом, азотосодержащие органические соединения могут быть обнаружены и идентифицированы по их ТГц-спектрам отражения в различных условиях (материал подложки, толщина исследуемого образца, угол падения зондирующего ТГц-пучка, поляризация ТГц-излучения). Результаты работы могу быть использованы при разработке ТГц-систем, предназначенных для детектирования веществ.

Список литературы

1. Liu X., et al. // Journal of Physics and Chemistry of Solids. 2011. V. 72. P. 1245-1250.
2. Xie J.. et al. // Optical Materials Express. 2018. V. 8. No. 1. P. 128-135.
3. Chen T., et al. // Spectrochimica Acta. Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. 2018. V. 205. P. 312-319.
4. Plekhanov A.A., et al. // Optical Engineering. 2023. V. 62. No. 3. P. 034109.
5. Chen T., et al. // Chemical Physics Letters. 2019. V. 731.
6. Ornik J., et al. // International Journal of Pharmaceutics. 2020. V. 581.
7. Baker C., et al. // Proceedings of the IEEE. 2007. V. 95. No. 8. P. 1559-1565.

УДК 535(06)+004(06)

А.И. МИНИБАЕВ[1], С.С. ХАРИНЦЕВ[1,2]
[1]Казанский (Приволжский) федеральный университет
[2]Институт прикладных исследований АН Республики Татарстан, Казань

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ФОНОННЫХ СОСТОЯНИЙ ИЗ КАЛОРИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

В работе была определена фононная плотность состояний (p-DOS) вещества, теплоёмкость которого задавалась с помощью комбинации моделей Дебая и Эйнштейна с нормально распределённым шумом для воссоздания экспериментальной ошибки в данных.

A.I. MINIBAEV[1], S.S. KHARINTSEV[1,2]
[1]Kazan (Volga Region) Federal University
[2]Intitute of Perspective Researches of Tatarstan Academy of Sciences, Kazan

DETERMINATION OF THE PHONON DENSITY OF STATES FROM CALORIMETRIC MEASUREMENTS

The work determined the phonon density of states (p-DOS) of a material whose specific heat was specified using a combination of Debye and Einstein models with normally distributed noise to recreate the experimental error in the data.

Анализ и исследование динамики кристаллической решётки является важным этапом для определения основных физических свойств полупроводников и полукристаллических веществ. Информацию о структурных особенностях материала можно получить исходя из данных вибрационных состояний кристаллической решётки, а именно фононной плотности состояний (p-DOS). В настоящее время для нахождения плотности фононных состояний используются различные подходы, которые включают в себя экспериментальные, расчётные, теоретические методы. Любая физическая система на подобии кристаллической решётки обладает беспорядком, который приводит к появлению новых физических особенностей, таких как избыточная плотность состояний – Бозонный пик, локализованные колебательные моды и т.п. Такие структурные проявления сложно описать теоретически с помощью расчётных методов, так как они непосредственно влияют на получаемые фононные колебательные спектры. Поэтому требуется использование иных экспериментальных-расчётных подходов для определения p-DOS.

В данной работе мы предлагаем определять p-DOS из калориметрических измерений. Довольно известный факт, что p-DOS связанна с теплоёмкостью *C(T)* интегральным уравнением Фредгольма первого рода,

$$C(T) = 3Nk_b \int_0^\infty g(\omega) \frac{\left(\frac{h\nu}{k_b T}\right)^2}{\left(1 - e^{\frac{h\nu}{k_b T}}\right)^2} e^{-\frac{h\nu}{k_b T}} d\nu.$$

поэтому решение обратной задачи Фредгольма позволит определить фононную плотность состояний из экспериментальных данных по теплоёмкости. Нужно отметить, что с математической точки зрения задача нахождения неизвестной подынтегральной функции g(ω) в этом уравнении, когда левая часть определена, является некорректной, поэтому напрямую решение подобной обратной задачи невозможно, так как полученное решение будет неустойчивым. Подход решения обратно некорректной задачи был ещё описан в 1954 году, в работе [1] впервые было показано существование устойчивого решения этой обратной задачи на уровне, огибающей фононного спектра, но самого решения найдено не было. С тех пор предлагаются разные методы для решения данной задачи. Общим в них является использование регуляризирующих операторов Тихонова [2 - 5] или быстро затухающих функций. Недостаток подхода, который подразумевает регуляризацию, заключается в том, что полученное решение плотности фононных состояний может быть отрицательно на некоторых частотах – такой результат нельзя назвать удовлетворительным. Поэтому наш подход основан на использовании физических моделей Дебая и Эйнштейна, которые выполняют роль ограничивающих функционалов.

В работе была определена фононная плотность состояний (p-DOS) вещества, теплоёмкость которого задавалась с помощью комбинации моделей Дебая и Эйнштейна с нормально распределённым шумом для воссоздания экспериментальной ошибки в данных.

Список литературы

1. Lifshits I.M. // Journal of Exper. and Theor. Phys. 1954. V. 26. P. 551-556.
2. Iveronova V.I., Tikhonov A.N., et al. // Solid State Physics. 1966. V. 8. P. 3459-3462.
3. Deus P., Frei V. // Czechoslovak Journal of Physics B. 1984. V. 34. P. 680-693.
4. Loram J.W. // Journal of Physics C: Solid State Physics. 1986. V. 19. P. 6113-6130
5. Costa É.D'M., Lemes N.H.T., et al. // Journal of Molecular Modeling. 2014. V. 20. P. 2360.

УДК 535(06)+004(06)

А.Н. ХОПЁРСКИЙ, А.М. НАДОЛИНСКИЙ, Р.В. КОНЕЕВ
Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону

ФОТОН-ФОТОННОЕ РАССЕЯНИИЕ В ПОЛЕ АТОМНОГО ИОНА

Теоретически предсказаны аналитическая структура, абсолютные значения и угловая анизотропия трижды дифференциального сечения упругого фотон-фотонного рассеяния в поле многозарядного неоноподобного атомного иона.

A.N. HOPERSKY, A.M. NADOLINSKY, R.V. KONEEV
Rostov State Transport University, Rostov-on-Don

PHOTON-PHOTON SCATTERING IN THE FIELD OF AN ATOMIC ION

The analytical structure, absolute values and angular anisotropy of the triple differential cross section of elastic photon-photon scattering in the field of a multiply charged neon-like atomic ion are theoretically predicted.

Исследован эффект упругого фотон-фотонного рассеяния через виртуальные возбуждения атомного иона. В качестве объекта исследования взят неоноподобный ион атома железа (Fe^{16+}; заряд ядра иона Z = 26, конфигурация и терм основного состояния $[0] = 1s^2 2s^2 2p^6 [^1S_0]$). Рассчитано трижды дифференциальное сечение $d^3\sigma / d(\hbar\omega_1) d\Omega_1 d\Omega_2 \equiv \sigma^{(3)}$ процесса рассеяния:

$$2\hbar\omega + [0] \to A \to B \to \hbar\omega_1 + \hbar\omega_2 + [0],$$

$$A = \hbar\omega + 1s\left\{\frac{n}{x}\right\} p(^1P_1),$$

$$B = \hbar\omega_i + 1s\left\{\frac{m}{y}\right\} p(^1P_1), \quad i = 1, 2.$$

где $m, n \in [3;\infty)$, $x, y \in [0;\infty)$, $\hbar\omega\,(\hbar\omega_1)$ – энергия падающего (рассеянного) фотона и Ω_i – пространственный угол вылета рассеянного фотона. Результаты расчёта в $\perp$–схеме эксперимента (векторы поляризации фотонов перпендикулярны плоскости рассеяния)

представлены на рис. 1. Установлены: 1) лидирующая роль томсоновского резонанса ($\hbar\omega_1 = \hbar\omega$) в сечении рассеяния; 2) ярко выраженные резонансные структуры сечения рассеяния в областях энергий «холодных» ($\omega_1 \sim I_{1snp}$) и «горячих» ($\omega_1 \sim 2\omega - I_{1snp}$) фотонов ($I_{1snp}$ – энергия $1s \to np$ фотовозбуждения), 3) эффекты деструктивной квантовой интерференции амплитуд вероятности переходов в виртуальные состояния дискретного и сплошного спектров и 4) эффект угловой анизотропии сечения рассеяния. Результаты данного исследования обобщают теорию и дополняют физические результаты работ авторов [3 - 5] переходом к третьему порядку теории возмущений и жесткому рентгеновскому диапазону энергий падающих на ион фотонов.

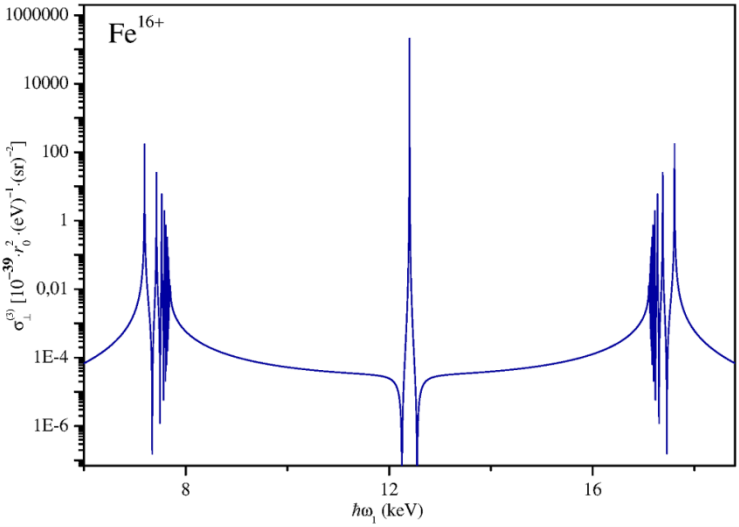


Рис. 1. Трижды дифференциальное сечение упругого фотон-фотонного рассеяния в поле иона Fe^{16+} для $\perp$ –схемы эксперимента, энергия падающего фотона $\hbar\omega$ = 12.40 keV ([1], European XFEL, Germany), $\hbar\omega_1$ – энергия рассеянного фотона, энергия порога ионизации $1s^2$-оболочки I = 7.7 keV, естественная ширина распада 1*s*–вакансии I_{1s} = 1.046 eV [2]

Список литературы

1. Feldhaus J., et al. // J. Phys. B. 2013. V. 46. P. 146002.
2. Chen M.H., et al. // Phys. Rev. A. 1981. V. 24. P. 1845.
3. Hopersky A.N., et al. // Phys. Rev. A. 2016. V. 93. P. 052701.
4. Hopersky A.N., et al. // Phys. Scr. 2018. V. 93. P. 105401.
5. Hopersky A.N., Nadolinsky A.M. // JETP Lett. 2018. V. 107. P. 282.

УДК 535(06)+004(06)

О.В. КОРОВАЙ, Д.А. МАРКОВ[1], Л.Ю. НАДЬКИН[1]
Севастопольский государственный университет
[1]Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко, Тирасполь

ВЛИЯНИЕ МНОГОФОТОННЫХ ПЕРЕХОДОВ НА ЗАКОН ДИСПЕРСИИ ЭКСИТОН-ПОЛЯРИТОНОВ

Приведены результаты теоретических исследований особенностей поведения законов дисперсии экситон-поляритонов, взаимодействующих с тремя импульсами когерентного лазерного излучения с частотами, находящимися в резонансе с оптически разрешёнными однофотонными, двухфотонными, а также прямым трёхфотонным переходом возбуждения триэкситонов. Показано, что закон дисперсии состоит из четырёх ветвей, положение и форма которых определяется Раби-частотами указанных переходов и плотностями фотонов трёх импульсов. Найдены значения параметров, при которых возможны пересечения ветвей закона дисперсии.

O.V. KOROVAI, D.A. MARKOV[1], L.Y. NAD'KIN[1]
Sevastopol State University
[1]Transnistrian State University named after T.G. Shevchenko, Tiraspol

EFFECT OF MULTIPHOTON TRANSITIONS ON THE LAW OF DISPERSION OF EXCITON-POLARITONS

The results of theoretical studies of the behavior of the laws of dispersion of exciton-polaritons interacting with three pulses of coherent laser radiation with frequencies in resonance with optically resolved single-photon, two-photon, as well as a direct three-photon excitation transition of triexitons are presented. It is shown that the law of dispersion consists of four branches, the position and shape of which is determined by the Rabi frequencies of these transitions and the photon densities of three pulses. The values of the parameters at which intersections of the branches of the law of variance are possible are found..

В последние годы ключевой технологией для реализации приложений передачи информации в квантовых сетях [1] и элементах квантовой памяти [2, 3] является поляритонная фотоника. Наличие экситонов, биэкситонов, триэкситонов и мультиэкситонных состояний [4] и возможность селективного управления их свойствами под действием когерентного лазерного излучения во многом определяют оптические характеристики полупроводниковых структур и, следовательно,

стимулируют развитие передовых исследований в различных прикладных областях.

Целью работы является теоретическое исследование поведения законов дисперсии экситон-поляритонов для установления фазовых соотношений между различными константами взаимодействия и возможности реализации контроля и управления процессами взаимодействия света с материальными возбуждениями среды (рис. 1).

Анализ полученных законов дисперсии позволяет сделать вывод, что при некоторых значениях частот Раби многофотонных переходов, разностей фаз между константами взаимодействий и изменяющихся расстройках резонансов второго и третьего импульса наблюдается пересечение поляритонных ветвей в различных областях значений расстроек резонансов второго и третьего импульсов соответственно при фиксированном значении расстройки резонанса первого импульса (рис. 2). При изменении значений частот Раби многотонных переходов наблюдается сближение и расталкивание поляритонных ветвей друг относительно друга, с изменением формы, что свидетельствует о смещении квазиуровней друг относительно друга при изменении расстройки резонанса первого импульса. Пересечение ветвей экситон-поляритонов обусловлено наличием в законе дисперсии интерференционных слагаемых.

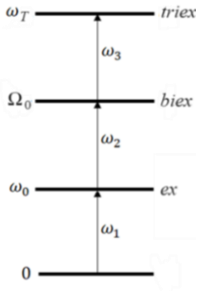


Рис. 1. Схема энергетического спектра полупроводника, взаимодействующего с фотонами трёх импульсов

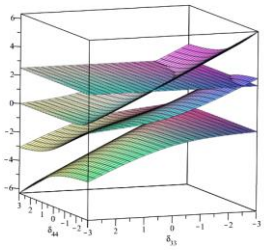


Рис. 2. Закон дисперсии $\Delta(\delta_2,\delta_3)$ при $\omega_{13} \neq 0$, $\omega_{14} = \omega_{24} = 0$ и $\vartheta_i = 0$ ($i = 1 \div 4$)

Список литературы

1. Vartape H. Kimble J. // Nature (London). 2008. V. 453. P. 1023.
2. Simon J., Tanji H., Ghosh S., Vuletić V. //Nat. Phys. 2007. V. 3. P. 765.
3. Tanji H., Ghosh S., Simon J., Bloom B., Vuletić V. // Phys. Rev. Lett. 2009. V. 103. P. 043601.
4. Katow H., Usukura J., Akashi R., Varga K., Tsuneyuki S. // Phys. Rev. B. 2017. V. 95. P. 125205.

Д.Р. ЯДРИХИНСКАЯ, В.В. ФИЛАТОВ
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

ФОРМИРОВАНИЕ ПРАВИЛЬНОЙ КРИСТАЛЛОПОДОБНОЙ ГРАВИТАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ В РЕЗОНАНСНОЙ ФОТОННОЙ ЛОВУШКЕ

Исследовано пленение электромагнитного поля резонансной фотонной ловушкой – оптической микрополостью типа Фабри–Перо. Установлено, что "захваченная" ловушкой электромагнитная энергия локализуется в регулярную кристаллоподобную гравитационную сверхструктуру, представляющую собой оптически-индуцированный гравитационный кристалл. Рассмотрены некоторые свойства такого метаматериала.

D.R. YADRIKHINSKAYA, V.V. FILATOV
Bauman Moscow State Technical University

FORMATION OF A REGULAR CRYSTAL-LIKE GRAVITATIONAL STRUCTURE IN A RESONANT PHOTONIC TRAP

The paper investigates confinement of electromagnetic field in a resonant photonic trap, a Fabry–Perot optical microcavity. The trapped electromagnetic energy localizes into a regular crystal-like massive superstructure, an optical-induced gravitational crystal. We discuss several interesting properties of a such metamaterial.

Резонансная фотонная ловушка – оптический резонатор типа Фабри–Перо, при возбуждении которого электромагнитным полем подходящей частоты

$$\omega = 2\pi\nu = 2\pi c/\lambda = 2\pi c/(2L/n) = \pi cn/L,$$

где L – линейный размер резонатора, $c = 3\times10^8$ м/с – скорость света в пустоте, а $n = 1,2,3...$ – любое натуральное число, вдоль оси резонатора (оси x) формируется стоячая световая волна

$$\boldsymbol{E}(x,t) = \boldsymbol{e}_y E_0 \sin(kx) \sin(\omega t),$$
$$\boldsymbol{B}(x,t) = \boldsymbol{e}_z B_0 \sin(kx) \sin(\omega t),$$

энергия которой

$$w = w_E + w_B = \varepsilon_0 E^2/2 + B^2/2\mu_0 = \varepsilon_0 E^2 = \varepsilon_0 E_0^2 \sin^2(kx) \sin^2(\omega t),$$

локализована в регулярно распределённых пучностях. Согласно Эйнштейну, это эквивалентно периодической материальной среде с эффективной плотностью

$$\rho = w/c^2 = (\varepsilon_0/c^2)\, E_0^2 \sin^2(kx) \sin^2(\omega t).$$

То есть, в фотонной ловушке, "пленившей" электромагнитное поле, возникает регулярная массивная периодическая сверхструктура (рис. 1).

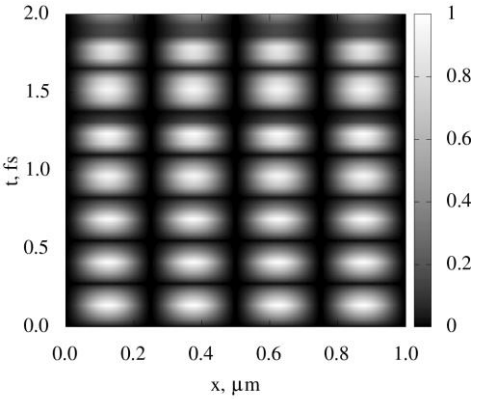


Рис. 1. Распределение плотности сверхструктуры, возникающей в фотонной ловушке, пленившей электромагнитную волну с $\lambda = 500$ нм (нормировано на максимум)

Возникновение правильной массивной сверхструктуры в пустом пространстве может быть истолковано как придание вакууму свойств, присущих кристаллу ("кристаллизация вакуума"). Очевидно, что лазерный луч, направленный на такой электромагнитно-индуцированный гравитационный кристалл, будет испытывать дифракцию (аналогично тому, как свет дифрагирует на ультразвуке). В рамках квантовой теории поля это означает существование "фононов", отвечающих за взаимодействие с лазерными фотонами, приводящее к их рассеянию. Предсказание вакуумных фононов открывает возможности для исследования эффектов квантовой гравитации в условиях контролируемого лабораторного эксперимента. В частности, открываются возможности создания устройств, манипулирующих гравитационными полями при помощи методов физики твёрдого тела.

А.М. КАБИСОВ[1,2]
[1]МИРЭА – Российский технологический университет, Москва
[2]Институт радиотехники и электроники РАН им. В.А. Котельникова, Москва

АННИГИЛЯЦИЯ ПАРЫ ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОН В ГРАВИТАЦИОННОМ ПОЛЕ

Обсуждается явление аннигиляции электрон-позитронной пары, наблюдающееся в гравитационном поле. Приведено теоретическое описание данного явления, основанного на законах сохранения энергии и импульса системы.

A.M. KABISOV[1,2]
[1]MIREA – Russian Technological University, Moscow
[2]Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS, Moscow

THE ELECTRON-POSITRON ANNIHILATION IN A GRAVITATIONAL FIELD

The phenomenon of the electron-positron annihilation, which is observed in a gravitational field is discussed. A theoretical description of this phenomenon based on the laws of conservation of energy and momentum of the system is given.

При столкновении электрон e^- и позитрон e^+ испаряются и происходит выделение энергии. В зависимости от условий протекания этой реакции величина и характер выделяемой энергии могут быть различными [1, 2]. В данной работе мы рассмотрим случай, когда электрон и позитрон находятся в слабом гравитационном поле $|\varphi| << c^2$ и начинают взаимодействие с одинаковыми начальными скоростями (импульсами) друг относительно друга, при этом $v << c$.

Целью работы является теоретическое описание данного явления, основанного только на законах сохранения энергии и импульса.

Запишем законы сохранения энергии и импульса системы электрон-позитрон.

$$\sqrt{\left(m_{e^-}c^2\right)^2+\left(p_{e^-}c\right)^2}+m_{e^-}\varphi+\sqrt{\left(m_{e^+}c^2\right)^2+\left(p_{e^+}c\right)^2}+m_{e^+}\varphi=E_0, \qquad (1)$$

$$\sqrt{\left(m'_{e^-}c^2\right)^2+\left(p'_{e^-}c\right)^2}+m'_{e^-}\varphi+\sqrt{\left(m'_{e^+}c^2\right)^2+\left(p'_{e^+}c\right)^2}+m'_{e^+}\varphi=E_f, \qquad (2)$$

$$\overrightarrow{p_f}-\overrightarrow{p_0}=\Delta\vec{p}=0, \qquad (3)$$

где m_{e^-}, m_{e^+}, p_{e^-}, p_{e^+} начальные массы и импульсы электрона и позитрона соответственно. Так как при аннигиляции излучаются эквивалентные по энергиями (частотам) фотоны, то энергию такой системы характеризует выражение (4):

$$E_f - E_0 = \Delta E = \sqrt{\left(Mc^2\right)^2 + \left(\Delta pc\right)^2} + M\varphi, \tag{4}$$

где M – масса системы фотонов. Обратим внимание, что импульс такой системы будет нулевым. Из выражений (1) и (2) получаем:

$$\Delta E = -\left(2\sqrt{\left(mc^2\right)^2 + \left(pc\right)^2} + 2m\varphi\right), \tag{5}$$

где m, p – масса, модуль начального (до процесса аннигиляции) импульса электрона/позитрона. Таким образом, получаем двухфотонное излучение с частотами $\hbar\omega$ соответственно. При этом в отсутствие гравитационного поля $\varphi = 0$, величина энергии каждого фотона будет составлять $\hbar\omega_0$. Зависимость энергий испускаемых фотонов от величины потенциала гравитационного поля определяет выражение (7).

$$\left|\Delta E\right| = 2\hbar\omega = 2\hbar\omega_0\left(1 + \frac{\varphi}{c^2}\right), \tag{6}$$

$$\hbar\omega = \hbar\omega_0\left(1 + \frac{\varphi}{c^2}\right). \tag{7}$$

Выражение (7) характеризует гравитационное красное смещение, если рассматривать аннигиляцию как источник излучения фотонов, то в зависимости от расстояния от источника гравитационного поля, будет меняться энергия (частота) испущенных фотонов.

Автор благодарен профессору Задерновскому А.А. за плодотворные обсуждения возникающих в ходе написания работы вопросов.

Список литературы

1. Stacy J.G., Vestrand W.T. Gamma-ray astronomy // Encyclopedia of Physical Science And Technology (Third edition). Academic Press, 2003, P. 97-432.

2. Hofmann W. Particle composition in hadronic jets in e+e- annihilation // Annual Review of Nuclear and Particle Science. 1988. V. 38(1). P. 279-322.

УДК 535(06)+004(06)

П.Ф. КАРЦЕВ, И.О. КУЗНЕЦОВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

КИНЕТИКА ВОЗБУЖДЕНИЙ В ЭЛЕКТРОННОМ ГАЗЕ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ОПТИЧЕСКИМ ИМПУЛЬСОМ: ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ С ВЫСОКИМ РАЗРЕШЕНИЕМ ПО ЭНЕРГИИ

Представлен систематический подход для описания кинетики возбуждений в ферми-газе с высоким разрешением по энергии и импульсам. Приведены основные теоретические соотношения, даны результаты расчётов для времён релаксации. Демонстрируется и обсуждается роль процессов переброса и формы зоны Бриллюэна.

P.V. KARTSEV, I.O. KUZNETSOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

EXCITATION KINETICS IN ELECTRON GAS AFTER OPTICAL PULSE EXCITATION: NUMERICAL SIMULATION WITH FINE ENERGY RESOLUTION

We present the systematic description for the excitation kinetics in the Fermi gas, benefitting from fine resolution in the energy- and momentum space. Main theoretical relations and calculation results for the quasiparticle relaxation times are given. The role of Umklapp processes and the Brillouin zone shape is demonstrated and discussed.

Экспериментальные исследования материалов методом "накачка – зондирование", где используется возбуждение носителей в зоне проводимости ультракоротким лазерным импульсом, позволяют получать данные о скоростях явлений и особенностях модели взаимодействия в данных материалах [1, 2]. Необходимой компонентой в таком исследовании является надежная теоретическая модель, которая позволяет связать результаты измерений с искомыми характеристиками. В нашей научной группе развивается подход моделирования кинетики возбуждённого состояния при помощи численного решения уравнения Больцмана. Ранее нами был разработан метод расчёта интегралов столкновений с использованием дискретной импульсной решётки [3]. Практически доступные размеры решётки составляют до 64 x 64 x 64, что

позволяет получать особенности распределения частиц с хорошим разрешением в импульсном пространстве [4].

В то же время существует класс задач, где необходимо использовать более высокую разрешающую способность – в том числе при оптическом возбуждении металлов и сверхпроводников. В данной работе представлены необходимые соотношения для численного моделирования электронного газа с высоким разрешением по энергии и импульсам. Используется кинетическое уравнение для функции распределения частиц с использованием непрерывного пространства импульсов. Параметрами уравнения являются время релаксации (рис. 1) и недиагональные кинетические коэффициенты (рис. 2), зависящие от импульсов. Были получены замкнутые формулы для данных коэффициентов в случае модели Зоммерфельда. В работе [5] был представлен упрощённый вариант такого уравнения для ферми-газа с усреднением по направлениям, в данном случае удалось учесть зависимость от направления импульса. Для учёта кристаллической решётки был применён метод Монте-Карло.

Работа поддержана проектом НИЯУ МИФИ «Приоритет-2030».

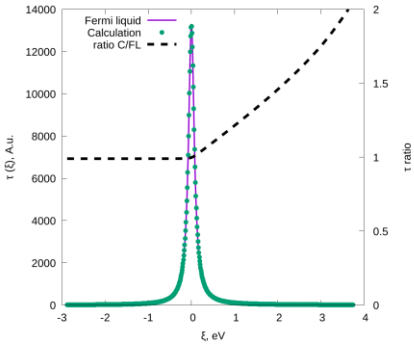


Рис. 1. Рассчитанное время релаксации в зависимости от энергии квазичастицы (F = 3.0 эВ, $k_F = 0.5\pi/a$, T = 300 K), штриховой линией показано сравнение с формулой из теории ферми-жидкости

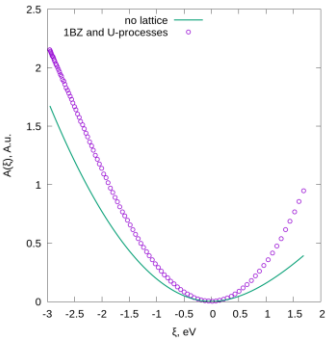


Рис. 2. Диагональный кинетический коэффициент в зависимости от энергии квазичастицы, сплошная линия – вариант без учёта кристаллической решётки, кружками – с учётом

Список литературы

1. Kusar P., Kabanov V.V., et al. // Phys. Rev. Lett. 2008. V. 101 (22). P. 227001.
2. Demsar J. // J. Low Temp. Phys. 2020. V. 201. P. 676.
3. Kuznetsov I.O., Kartsev P.F. // Phys. Rev. E. 2023. V. 107. P. 055304.
4. Kartsev P.F., Kuznetsov I.O. // J. Phys.: Condens. Matter. 2021. V. 33. P. 295601
5. Kabanov V.V., Alexandrov A.S. // Phys. Rev. B. 2008. V. 78 (17). P. 174514.

УДК 535(06)+004(06)

С.В. КОПЫЛОВ
Московский политехнический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОДИФИКАЦИИ ОПЕРАТОРА ДАЛАМБЕРА НА МАССОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УРАВНЕНИЯ КЛЕЙНА–ГОРДОНА–ФОКА

Приведены результаты исследования влияния модификации оператора Даламбера на массовые характеристики уравнения Клейна–Гордона–Фока (КГФ). Рассмотрен вариант модификации дробно-линейного типа. Показано, что при выбранной модификации масса описываемого объекта ограничена сверху так называемой массой Стони.

S.V. KOPYLOV
Moscow Polytechnic University

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF MODIFICATION OF THE DALEMBERT OPERATOR ON THE MASS CHARACTERISTICS OF THE KLEIN-GORDON-FOCK EQUATION

The results of investigation of influence of modification of the Dalembert operator on mass characteristics of the Klein–Gordon–Fock equation are presented. A variant of modification of fractional linear type is considered. It is shown that at the chosen modification the mass of the described object is bounded from above by the so-called Stoney mass.

Для констант: c – скорость света, h – постоянная Планка, G – гравитационная константа Ньютона и q – элементарный (например, электрический) заряд рассмотрены «естественные» системы единиц [1].

«Естественная» система планковских единиц [2] базируется на константах $\{c, h, G\}$. Известна также система «естественных» единиц Стони [3] базирующаяся на константах $\{c, q^2, G\}$. Однако физическая размерность констант q^2 и G зависит от размерности конфигурационного пространства D. Это видно из соотношений $G_{(D)}ch/c^4 = [\mathrm{L}]^{D-1}$ и $q_{(D)}{}^4/hc = [\mathrm{L}]^{D-3}$ поскольку физическая размерность констант c и h от D не зависит. Отсюда индекс (D), у констант $G_{(D)}$ и $q_{(D)}$. Везде ниже мы договоримся его опускать.

Не сложно заметить, что $q^2/G = M_{St}{}^2$, где M_{St} – масса Стони, от D не зависит. Это позволяет построить систему «естественых» единиц $\{c, h, q^2/G\}$ с физической размерностью её составляющих не зависящих от D.

Введём квадрат комптоновской длины массы Стони $Gh^2/c^2q^2 = L^2$. Тогда $L^2\Box$ – безразмерная релятивистски-инвариантная величина, инвариантная также по отношению к изменению размерности конфигурационного пространства. Здесь $\Box$ – оператор Даламбера.

Заменим в уравнении КГФ оператор Даламбера $\Box$ на дробно-линейное выражение $\Box/(1+L^2\Box)$. Будем искать решение этого уравнения в виде плоских волн (свободных объектов).

Обозначим через m массивный параметр уравнения КГФ, а через M массивный параметр плоской волны. Получаем: при $m << M_{St} \rightarrow M \approx m$, а при $m >> M_{St} \rightarrow M \approx M_{St}$. Таким образом массивный параметр свободного объекта ограничен массой Стони.

Это означает, что для масс больших массы Стони волновой функции свободного состояния не существует. Поскольку решения уравнения КГФ это волновые функции, конечно, взятые в положительно и отдельно отрицательно частотной областях [4]. При этом конечно все релятивистские соотношения для тел с массой в том числе больше массы Стони остаются в силе.

Как следствие переход к другим известным уравнениям [5, 6] осуществляется аналогично, с включением взаимодействий по схеме удлинения производных [7].

Список литературы

1. Копылов С.В. Инвариантные константы многомерных пространств // В сб. LIV Всероссийская конференция по проблемам динамики, физики частиц, физики плазмы и оптоэлектроники: тезисы докладов. Москва: РУДН, 2018.

2. Томилин К.А. Фундаментальные физические постоянные в историческом и методологическом аспектах. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006.

3. Wilczek F. Fundamental Constants. arXiv:0708.4361v1 [hep-ph] 31 Aug 2007.

4. Quantum Mechanics: Fundamental Principles and Applications John F. Dawson Department of Physics, University of New Hampshire, Durham, NH 03824 October 14, 2009.

5. Березин Ф.А., Шубин М.А. Уравнение Шрёдингера. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1983.

6. Bagrov V.G., Gitman D. The Dirac Equation and its Solutions. Walter de Gruyter GmbH, 2014.

7. Славнов А.А., Фаддеев Л.Д. Введение в квантовую теорию калибровочных полей. М.: Наука, 1978.

УДК 535(06)+004(06)

О.Ф. ВАСИЛЬЕВА
Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко, Тирасполь

ВРЕМЕННАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ОПТИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО НЕЛИНЕЙНОГО ОСЦИЛЛЯТОРА НА ЭКСИТОН-ДИПОЛЯРИТОНАХ

Изучена временная эволюция экситон-диполяритонов в полупроводниковом микрорезонаторе (при накачке двумя лазерными импульсами с близкими частотами) состояния, отвечающего средней диполяритонной ветви. Показано, что в условиях точного резонанса при учёте эффектов затухания среды огибающие максимумов и минимумов плотностей экситон-диполяритонов экспоненциально убывают, однако при малых коэффициентах затухания можно наблюдать осцилляционную конверсию квазичастиц.

O.F. VASILIEVA
Transnistrian State University named after T.G. Shevchenko, Tiraspol

TIME EVOLUTION OF AN OPTICAL PARAMETRIC NONLINEAR OSCILLATOR BASED ON EXCITON-DIPOLARITONS

The time evolution of exciton-dipolaritons in a semiconductor microcavity (pumped by two laser pulses with similar frequencies) of the state corresponding to the middle dipolariton branch has been studied. It is shown that under conditions of exact resonance, taking into account the effects of damping of the medium, the envelopes of the maxima and minima of the densities of exciton-dipolaritons decrease exponentially, however, at low damping coefficients, oscillatory conversion of quasiparticles can be observed.

Первой попыткой контроля экситон-поляритонных взаимодействий, было использование концепции экситон-диполяритонов [1] путём включения двойных асимметричных квантовых ям в полупроводниковый микрорезонатор. Диполяритон представляет собой квазичастицу, которая является суперпозицией фотона микрорезонатора, прямого и непрямого экситонов. Связанное состояние фотона с экситонами приводит к образованию собственных мод системы с тремя ветвями закона дисперсии [2]. В [3] получено, что диполяритоны в микрорезонаторах на основе дихалькогенидов переходных металлов могут использоваться для проектирования оптических переключателей и транзисторов для

оптоэлектронных интегральных микросхем. В [4] были оптимизированы структурные параметры микрорезонатора, путём внедрения двойных квантовых ям AlGaAs, показано, что интенсивность терагерцового излучения максимальна, если частоты накачки соответствуют различным диполяритонным состояниям.

Целью работы является теоретическое исследование временной эволюции экситон-диполяритонов при накачке средней ветви в двух близких по энергии точках закона дисперсии. При этом возможны три канала рассеяния диполяритонов, удовлетворяющие законам сохранения энергии и импульса [5].

Получено, что когда начальная плотность накачки одного из pump-диполяритонов больше либо меньше плотности накачки второго pump-диполяритона, то временная эволюция системы в отсутствии затуханий представляет собой периодическое превращение пары pump-диполяритонов первого и второго импульсов в диполяритоны сигнальной и холостой мод на средней ветви закона дисперсии. При малых коэффициентах затухания временная эволюция плотностей диполяритонов представляет собой осцилляционную конверсию диполяритонов накачки обоих импульсов в диполяритоны сигнальной и холостой мод на средней ветви закона дисперсии. При этом максимальные значения квазичастиц монотонно уменьшаются с течением времени. В процессе эволюции системы возникают режимы, когда плотность диполяритонов накачки первого импульса равна плотности диполяритонов сигнальной моды на средней ветви закона дисперсии, при этом плотность диполяритонов холостой моды на средней ветви закона дисперсии равна нулю. При больших постоянных затухания огибающие максимумов и минимумов плотностей диполяритонов экспоненциально убывают со временем. При этом расстояние между двумя соседними максимумами (минимумами) увеличивается со временем. Таким образом временная эволюция системы квазичастиц существенно определяется начальными параметрами системы.

Список литературы

1. Cristofolini P., Christmann G., et al. // Science. 2012. V. 336. P. 704.

2. Nalitov A.V., Solnyshkov D.D., Gippius N.A., Malpuech G. // Phys. Rev. B. 2014. V. 90. P. 235304.

3. Kolmakov G., Byrnes T., He A., Kezerashvili R.Ya. // APS Physics. 2016. V. 64. P. 2.

4. Seedhouse A., Wilkes J., Kulakovskii V. D., Muljarov E. A. // Optics Letters. 2019. V. 44. No. 17. P. 4339-4342.

5. Хаджи П.И., Васильева О.Ф., Белоусов И.В. // ЖЭТФ. 2018. Т. 153. Вып. 2. С. 179-192.

УДК 535(06)+004(06)

В.В. ВОЛКОВА, В.В. ФИЛАТОВ
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

КОЛЬЦЕВАЯ РЕЗОНАНСНАЯ ФОТОННАЯ ЛОВУШКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЯХ ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

Представлены результаты моделирования кольцеобразной резонансной фотонной ловушки, позволяющей проводить коллайдерные исследования в бозе-конденсированном световом поле.

V.V. VOLKOVA, V.V. FILATOV
Bauman Moscow State Technical University

RING-SHAPED RESONANT PHOTON TRAP FOR INVESTIGATIONS IN STRONG ELECTROMAGNETIC FIELD

The paper reports a ring-shaped resonant photon trap to perform collider investigations in Bose-condensed light.

Фотонная ловушка (ФЛ) – резонансная оптическая микрополость, «пленяющая» электромагнитное поле резонансной частоты в виде стоячей световой волны – поляритонного конденсата Бозе–Эйнштейна (БЭК) [1 - 3]. В настоящей работе представлены результаты моделирования кольцеобразной резонансной фотонной ловушки, достоинством которой является возможность проведения манипуляций объектами различного масштаба: частицами, ядрами, атомами, молекулами или молекулярными кластерами – в области сверхсильного электромагнитного поля БЭК.

Принципиальная схема кольцевой ФЛ приведена на рис. 1. Ловушка представляет собой прямой круговой цилиндр, открытый с обоих торцов, изготовленный из металлического материала с плазменной частотой, превосходящей частоту пленяемого излучения. В боковой стенке цилиндра присутствует небольшое отверстие, сквозь которое в ловушку вводится излучение внешнего лазера, при этом диаметр цилиндра ФЛ согласован с длиной волны лазерной генерации таким образом, чтобы интерференционный максимум находился в центре ловушки, а минимум распределялся по боковой стенке. Для поддержания резонансной добротности и подавления чёрнотельного излучения стенки ловушки

снаружи принудительно охлаждаются, что позволяет получить в фокусе ФЛ электромагнитное поле высокой интенсивности – БЭК. Объекты исследования инжектируются в область БЭК вдоль оси цилиндра, при этом отсутствие у цилиндра обоих оснований позволяет вводить в ловушку также и встречные пучки, открывая возможности наблюдения за особенностями протекания столкновительных процессов в присутствии δ-резонансного электромагнитного поля БЭК [4].

Расчёты показывают, что резонансное пленение ФЛ излучения непрерывного лазера при неограниченной длительности экспозиции и постоянном гелиевом охлаждении стенок позволит за разумный срок (несколько часов [5]) получить в фокусе ловушки БЭК швингеровской интенсивности, сделав нелинейные эффекты квантовой электродинамики доступными для наблюдения. Среди потенциальных применений разработанной фотонной ловушки отметим чрезвычайно интересную возможность моделирования процессов «горячей» Вселенной в рамках контролируемого лабораторного эксперимента.

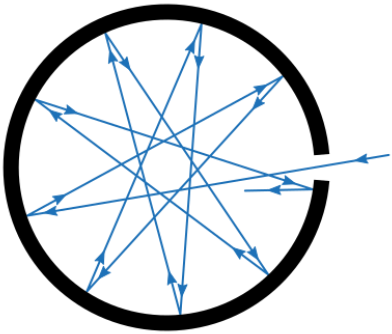


Рис. 1. Принципиальная схема кольцевой фотонной ловушки

Список литературы

1. Кудрявцев А.П. и др. // ЖТФ. 2007. Т. 77 (11). С. 78-82.

2. Минин И.В. и др. // Квантовая электроника, 2016, Т. 46 (6). С. 555-557.

3. Волкова В.В., Филатов В.В. // Труды XII всерос. конф. «Необратимые процессы в природе и технике». Москва, 2023. Т. 2. С. 237-239.

4. Соколов П.М. и др. // Патент № RU 195095 МПК B01J19/12.

5. Крупская А.Е., Филатов В.В. // Труды XII всерос. конф. «Необратимые процессы в природе и технике». Москва, 2023. Т. 2. С. 233-236.

УДК 535(06)+004(06)

С.А. АСТАШКЕВИЧ, А.А. КУДРЯВЦЕВ[1]
Санкт-Петербургский государственный университет
[1]Харбинский технологический институт, Китай

САМОСОГЛАСОВАННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАТРИЙСОДЕРЖАЩЕЙ РЕЗОНАНСНОЙ ФОТОПЛАЗМЫ ДЛЯ КОНТУРА ФОЙГТА

Предложена процедура самосогласованного определения параметров Na и Na–Ar резонансной фотоплазмы для случая контура Фойгта в предположении пространственно однородной фотоплазмы. Определены зависимости концентрации и температуры электронов от давления Na и Ar в газовой ячейке.

S.A. ASTASHKEVICH, A.A. KUDRYAVTSEV[1]
Saint-Petersburg State University
[1]Harbin Institute of Technology, China

SELF-CONSISTENT MODELING OF Na-CONTAINING RESONANCE PHOTOPLASMA FOR THE VOIGT PROFILE

A procedure for self-consistent determination of the parameters of the Na and Na-Ar resonance photoplasma for the case of the Voigt contour under the assumption of a spatially homogeneous photoplasma was proposed. The dependences of the electron density and temperature on the pressure of Na and Ar in a gas cell were determined.

В [1] нами была предложена модель самосогласованного определения параметров Na–Ar фотоплазмы для случая доплеровского контура резонансных линий Na. Однако, даже при сравнительно небольших давлениях Na и Ar необходим учёт столкновительного уширения резонансных линий. Поэтому в настоящей работе эта модель была развита на более общий случай контура Фойгта. Нами был рассмотрен случай накачки резонансных уровней Na непрерывным спектральным излучением (газовой лампы, солнечного), далекий от оптического насыщения. Предполагалось, что эффективное время жизни резонансных уровней меньше времени тушения этих уровней в плазме. В этом случае фотоплазму можно рассматривать как пространственно квазиоднородную [2, 3]. Наша модель учитывала: перенос резонансного излучения в приближении Бибермана–Холстейна, процессы хемоионизации с учётом резонансных и высоковозбуждённых уровней Na, упругие и неупругие столкновения электронов с этими уровнями и амбиполярную диффузию зарядов в фотоплазме. Совместно решалась система уравнений баланса

заселенностей уровней Na и энергии электронов. Параметры фотоплазмы определялись в результате итерационной процедуры.

На рис. 1 приведены полученные зависимости концентрации N_e и температуры T_e электронов от давления Na в фотоплазме в цилиндрической ячейке радиуса $R = 0.5$ см и длины $L = 4R$. Эти данные получены для чистых паров Na и для Na–Ar смеси для отношения давлений Ar и Na $P_{Ar}/P_{Na} = 10^3$ при газовой температуре $T_g = 680$ K. Плотность резонансной оптической накачки ячейки была 40 Вт/(м^2·нм). Видно экспоненциальное возрастание концентрации электронов с увеличением P_{Na} (рис. 1*а*). Температура электронов сильно нелинейно возрастает с ростом P_{Na} (рис. 1*б*). Добавление Ar приводит, с одной стороны, к уменьшению минимального давления Na, при котором возможно получить фотоплазму, и, с другой стороны, к уменьшению T_e при достаточно больших значениях P_{Na}, что связано с возрастанием потерь энергии электронов при упругих столкновениях с атомами Ar.

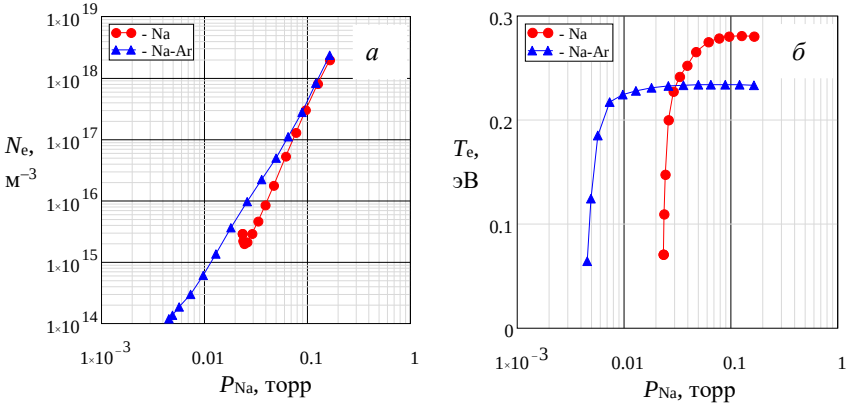


Рис. 1. Зависимости концентрации (*а*) и температуры (*б*) электронов от P_{Na} в натриевой (Na) и натрий–аргоновой при $P_{Ar}/P_{Na} = 10^3$ (Na–Ar) фотоплазме

Полученные результаты представляют интерес в проектировании фотоэлектрических преобразователей на основе натрийсодержащей фотоплазмы.

Список литературы

1. Astashkevich S.A., Kudryavtsev A.A. // Phys. Plasmas. 2019. V. 26. No. 10. P. 103509.

2. Ключарев А.Н., Безуглов Н.Н. Процессы возбуждения и ионизации атомов при поглощении света. Л.: Изд-во ЛГУ, 1983.

3. Astashkevich S.A., Kudryavtsev A.A. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 2024. V. 313. P. 108826.

УДК 535(06)+004(06)

С.А. АСТАШКЕВИЧ
Санкт-Петербургский государственный университет

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДЛИНЫ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ НА ПАРАМЕТРЫ ФОТОПЛАЗМЫ

Представлены результаты модельного определения концентрации и температуры электронов в Na–Ar фотоплазме в цилиндрической ячейке радиуса R = 0.5 см при разной длине L (L/R = 1, 2, 4 и ∞). Эти данные получены в широком диапазоне давления натрия и отношении давлений Ar и Na P_{Ar}/P_{Na} = 100. Изучена зависимость этих параметров от концентрации резонансных уровней Na.

S.A. ASTASHKEVICH
Saint-Petersburg State University

ANALYSIS OF THE EFFECT OF CYLINDRICAL CELL LENGTH ON PHOTOPLASMA PARAMETERS

The results of model determination of the electron debsity and temperature in Na–Ar photoplasm in a cylindrical cell of radius R = 0.5 cm at different lengths L (L/R = 1, 2, 4 and ∞) are presented. These data were obtained in a wide range of sodium pressure and the ratio of Ar and Na pressures P_{Ar}/P_{Na} = 100. The dependence of these parameters on the density of resonance Na levels has been investigated.

Известно, что перенос излучения и зарядов в плазме зависит от размеров пространства, которые она занимает. Для цилиндрической ячейки радиуса R и длины L оценка характерного размера для переноса излучения равна $r = [(1/R)^2 + (1/L)^2]^{-1/2}$, а диффузионная длина для переноса зарядов равна $\Lambda = [(2.4/R)^2 + (\pi/L)^2]^{-1/2}$ [1].

В рамках самосогласованной модели [2] нами были определены параметры Na–Ar резонансной фотоплазмы в цилиндрической ячейке радиуса R = 0.5 см при разной длине L (L/R = 1, 2, 4 и ∞). Эти данные получены для разных давлений натрия P_{Na}, отношения давлений Na и Ar P_{Ar}/P_{Na} = 100, газовой температуры T_g = 640 K и для плотности резонансной оптической накачки ячейки F = 40 Вт/(м^2·нм). Установлено, что, несмотря на сравнительно небольшие изменения концентрации резонансных 3^2P уровней Na при изменении величины L/R (рис. 1*а*), изменения концентрации электронов (рис. 1*б*) и ионов Na_2+ (рис. 2*а*), а также электронной температуры (рис. 2*б*) являются значительными. При увеличении длины ячейки величины r и Λ увеличиваются, что приводит, с одной стороны, к увеличению эффективного времени жизни резонансных

уровней Na, а, с другой стороны, к увеличению времени амбиполярной диффузии. Оба этих эффекта ведут к увеличению концентрации электронов (рис. 1*б*). Увеличение размера ячейки также приводит к увеличению потерь энергии электронов при упругих столкновениях с атомами, что приводит к уменьшению температуры электронов (рис. 2*б*). Эти изменения также приводят к немонотонным изменениям концентрации ионов Na_2^+ (рис. 2*а*).

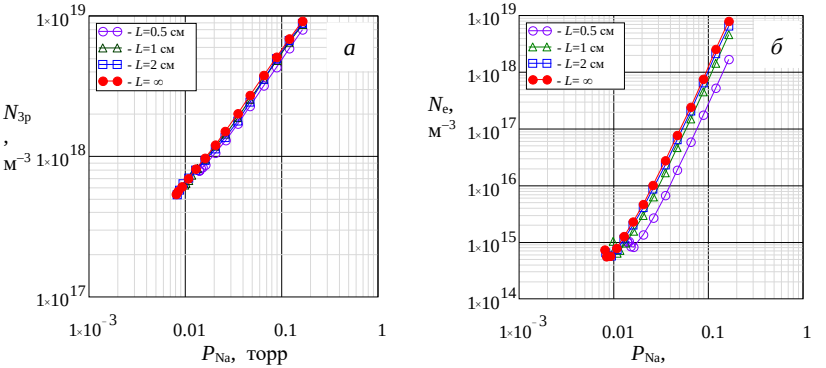


Рис. 1. Зависимости концентрации резонансных уровней Na (*а*) и электронов (*б*) в цилиндрической ячейке от давления Na при разных значениях длины ячейки.

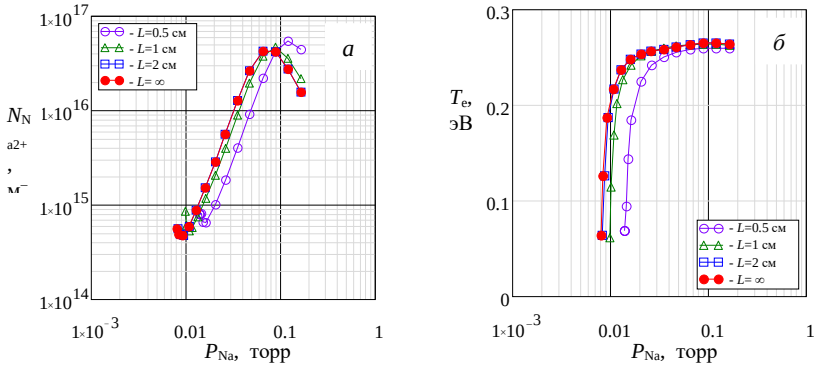


Рис. 2. Зависимости концентрации ионов Na_2^+ (*а*) и температуры электронов (*б*) в цилиндрической ячейке от давления Na при разных значениях длины ячейки

Список литературы

1. Astashkevich S.A., Mandour M.M., Kudryavtsev A.A. // J. Quant. Spectr. Rad. Transf. 2022. V. 288. P. 108256.

2. Astashkevich S.A., Kudryavtsev A.A. // J. Quant. Spectr. Rad. Transf. 2024. V. 313. P. 108826.

УДК 535(06)+004(06)

М.А. КУЛАГИНА, В.В. ФИЛАТОВ
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОДНОМЕРНОЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ АКУСТОИНДУЦИРОВАННОЙ ФОТОННОЙ СРЕДЫ

В работе исследованы оптические свойства однородной прозрачной среды в условиях внешнего гармонического акустического воздействия, приводящего к фотоупругому образованию в материале периодической оптической сверхструктуры. Материальная среда приобретает свойства «плавного» (с плавным изменением оптического контраста) фотонного кристалла, параметрами которого (периодом и оптическим контрастом «слоёв») можно управлять в динамическом режиме. Такой акустоиндуцированный фотонный кристалл представляет собой новый оптический метаматериал.

M.A. KULAGINA, V.V. FILATOV
Bauman Moscow State Technical University

SIMULATION FOR OPTICAL FEATURES OF ONE-DIMENSIONAL ACOUSTICALLY-INDUCED PERIODICAL PHOTONIC MEDIUM

The paper investigates the optical features of a homogeneous transparent medium under external harmonic acoustic disturbance leading to the photoelastic formation of a periodic optical superstructure. The medium becomes a “smooth” (with a smooth change in optical contrast) photonic crystal with dynamically controllable parameters. This acoustically induced photonic crystal is a new optical metamaterial.

В настоящее время одним из важнейших методов исследования напряжённо-деформированного состояния инженерных конструкций и узлов является изучение распределения показателя преломления в прозрачной полимерной модели под внешним нагружением (фотоупругая поляриметрия). В этом случае неоднородность поля внутренних механических напряжений приводит к возникновению в первоначально изотропном материале оптической анизотропии, позволяющей визуально определить область критических деформаций. В данной работе анализируется возможность применения фотоэластического эффекта для создания акустооптического метаматериала, обладающего периодической сверхструктурой, – акустоиндуцированного фотонного кристалла.

Рассмотрим однородную оптическую среду во внешнем гармоническом акустическом поле. Подобная конфигурация может быть получена, например, путём возбуждения стоячей звуковой волны в акустическом резонаторе, заполненном оптически прозрачным материалом (в частности, атмосферным воздухом). Гармоническое акустическое возмущение формирует вдоль оси резонатора (оси x) периодическое поле напряжений (давлений)

$$\sigma(x,t) = \sigma_0 \sin(\omega_0 t) \sin(k_0 x),$$

приводящее к возникновению в веществе избыточной плотности

$$\Delta\rho(x,t) = \Delta\rho_0 \sin(\omega_0 t) \sin(k_0 x),$$

фотоупругим образом влияющей на показатель преломления:

$$\Delta n(x,t) = \Delta n_0 \sin(\omega_0 t) \sin(k_0 x).$$

Под воздействием гармонического акустического поля в материальной среде формируется правильная периодическая оптическая сверхструктура.

При работе в оптическом диапазоне ($\omega \sim 10^{15}$ рад/с) можно пренебречь изменением «акустического» сомножителя $\sin(\omega_0 t)$ за период световых колебаний (поскольку $\omega_0 < 10^{10}$ рад/с), что позволяет рассматривать акустоструктурированную среду как эффективный одномерный фотонный кристалл с плавным изменением оптического профиля

$$\Delta n(x) \sim \sin(k_0 x).$$

На коротких ($\tau \ll 1/\omega_0$) временны́х интервалах метаматериал ведёт себя как простой одномерный фотонный кристалл, на длительных же ($\tau > 1/\omega_0$) промежутках времени сверхструктура представляет собой непрерывную суперпозицию разноконтрастных одномерных фотонных кристаллов единого периода.

Важнейшей особенностью полученного метаматериала является возможность перестройки его сверхрешётки в динамическом режиме путём изменения частоты генерации внешнего звукового источника. Это качество открывает широкие возможности для практического применения.

УДК 535(06)+004(06)

А.Н. ХОПЁРСКИЙ, А.М. НАДОЛИНСКИЙ, Р.В. КОНЕЕВ
Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону

РАСЩЕПЛЕНИЕ ФОТОНА АТОМНЫМ ИОНОМ

Теоретически предсказаны аналитическая структура, абсолютные значения и угловая анизотропия четырежды дифференциального сечения расщепления рентгеновского фотона неоноподобным атомным ионом.

A.N. HOPERSKY, A.M. NADOLINSKY, R.V. KONEEV
Rostov State Transport University, Rostov-on-Don

SPLITTING OF A PHOTON BY AN ATOMIC ION

The analytical structure, absolute values, and angular anisotropy of the quadruple differential splitting cross section of an X-ray photon by a neon-like atomic ion are theoretically predicted.

В третьем (по числу вершин взаимодействия) порядке нерелятивистской квантовой теории возмущений исследован эффект упругого расщепления рентгеновского фотона через виртуальные возбуждения глубокой $1s^2$ – оболочки атомного иона. В качестве объекта исследования взят неоноподобный ион атома железа (Fe^{16+}; заряд ядра иона Z = 26, конфигурация и терм основного состояния $[0]=1s^2 2s^2 2p^6[^1S_0]$). Рассчитано четырежды дифференциальное сечение $d^4\sigma/d(\hbar\omega_1)d(\hbar\omega_2)d\Omega_1 d\Omega_2 \equiv \sigma^{(4)}$ процесса расщепления как временной последовательности (на диаграммах Фейнмана):

$$\hbar\omega + [0] \to K_1,$$

$$K_1 \to K_2 + \hbar\omega_i + \hbar\omega_j,$$

$$K_2 \to [0] + \hbar\omega_\alpha,$$

$$K_1 = 1s\left\{\begin{matrix} n \\ x \end{matrix}\right\} p[^1P_1], \quad K_2 = 1s\left\{\begin{matrix} m \\ y \end{matrix}\right\} p[^1P_1],$$

где $x, y \in [0;\infty)$, $n, m \in [3;\infty)$, $\hbar\omega$ ($\hbar\omega_{i,j,\alpha}$) – энергия падающего (рассеянного; i, j, α = 1,2,3) фотона и Ω_i – пространственный угол вылета рассеянного фотона. Результаты расчёта в $\perp$-схеме эксперимента

(векторы поляризации фотонов перпендикулярны плоскости рассеяния) представлены на рис. 1. Установлены ярко выраженные эффекты возникновения трёх резонансных структур сечения расщепления и его угловой анизотропии (преимущественное расщепление в направлении углов $\theta = 0°$, $180°$ для $\|$–схемы эксперимента и эксперимента с неполяризованными фотонами).

Предсказанные результаты могут быть проверены в экспериментах по рассеянию излучения рентгеновского лазера на свободных электронах [1] ионом в газовой фазе [3], захваченным в «ловушке» [4].

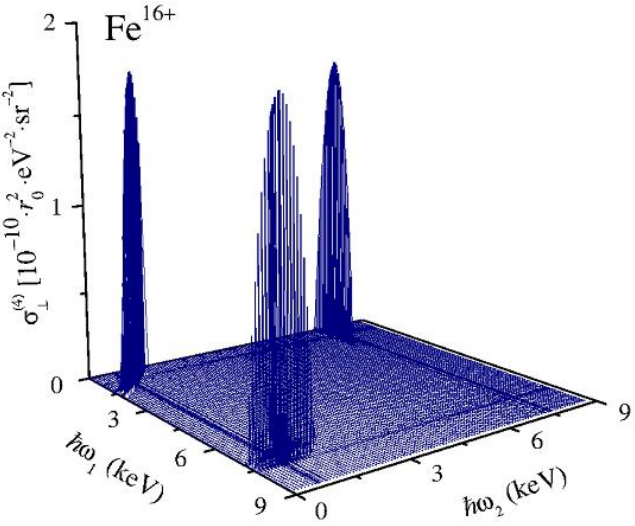


Рис. 1. Четырежды дифференциальное сечение расщепления фотона ионом Fe^{16+} для $\perp$ -схемы эксперимента. Энергия падающего фотона $\hbar\omega = 9$ keV [1], $\hbar\omega_{1,2}$ – энергии рассеянных фотонов, энергия порога ионизации $1s^2$-оболочки $I_{1s} = 7.7$ keV, естественная ширина распада $1s$ – вакансии $\Gamma_{1s} = 1.046$ eV [2]

Список литературы

1. Bostedt C., et al. // J. Phys. B. 2013. V. 46. P. 164003.
2. Chen M.H., et al. // Phys. Rev. A. 1981. V. 24. P. 1845.
3. Kühn S., et al. // Phys. Rev. Lett. 2022. V. 129. P. 245001.
4. Micke P., et al. // Rev. Sci. Instrum. 2018. V. 89. P. 063109.

УДК 535(06)+004(06)

Д.А. ГАВРИЛОВЕЦ, А.Д. КОТОВА, П.Д. РАСИХИНА,
В.В. ФИЛАТОВ
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ ДЛЯ ГИПЕРКОМБИНАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ЗВУКОВЫХ ПОЛЯХ

Исследованы акустические свойства двухкомпонентных фотонных кристаллов при одномерной геометрии рассеяния. Установлено присутствие в акустических спектрах запрещённых фононных зон, на границах которых плотность фононных состояний резонанса. Резонансное акустическое поле, локализованное вблизи поверхности фотонного кристалла, может быть использовано в усиленной акустической спектроскопии.

D.A. GAVRILOVETS, A.D. KOTOVA, P.D. RASIKHINA,
V.V. FILATOV
Bauman Moscow State Technical University

PHOTONIC CRYSTALS FOR HYPER-RAMAN INVESTIGATIONS IN SOUND

The paper studies the acoustics of bi-component photonic crystals in 1D geometry. The analysis reveals acoustic bandgaps with resonant density of phonon states on the bandgap edge. The results are important for enhanced acoustic spectroscopy.

Фотонные кристаллы – наноструктурированные композиционные материалы («метаматериалы»), периодическая оптическая сверхструктура которых («сверхрешётка») обусловливает присутствие в оптических спектрах одной или нескольких запрещённых фотонных зон («стоп-зон»). Наличие дискретной сверхрешётки позволяет ожидать существования запрещённых зон также и в колебательных спектрах, что представляет особенный интерес для задач прикладной акустической спектроскопии. Целью настоящего исследования является выяснение акустических особенностей двухкомпонентных фотонных кристаллов, перспективных для акустоспектроскопических применений.

Для уменьшения громоздкости выкладок ограничимся рассмотрением акустических свойств фотонного кристалла вдоль одного кристаллографического направления, что позволит представить реальный трёхмерный образец эффективной одномерной брэгговской стопкой

(«сэндвичем»). Примем также, что исходный кристалл (а значит, и моделирующий его «сэндвич») является двухкомпонентным, то есть, таким, в котором все слои одинаковой чётности тождественны (все нечётные слои идентичны друг другу, также как и все чётные, однако чётные и нечётные слои различаются между собой), поскольку именно такие кристаллы в настоящее время представляют наибольший практический интерес. Тогда, отмечая индексом «1» величины, соответствующие нечётным слоям, а индексом «2» – чётным, получим следующий закон дисперсии акустического поля в «сэндвиче»:

$$\cos ka = \cos k_1a_1 \times \cos k_2a_2 - ½ \times (v_1/v_2 + v_2/v_1) \times \sin k_1a_1 \times \sin k_2a_2. \quad (1)$$

Здесь a_i – протяжённости слоёв ($a = a_1 + a_2$), v_i – скорости звука в слоях, $k_i = \omega/v_i$ – волновые числа.

Решение (1), очевидно, есть

$$k(\omega) = (a_1 + a_2)^{-1} \arccos\{\cos(\omega a_1/v_1) \cos(\omega a_2/v_2) - ½ \times (v_1/v_2 + v_2/v_1) \times \sin(\omega a_1/v_1) \sin(\omega a_2/v_2)\} \quad (2)$$

и определяет закон дисперсии акустического поля в обратном виде $k = k(\omega)$ (вместо привычного $\omega = \omega(k)$).

Обратим внимание на ограниченность области определения функции арккосинуса: это обстоятельство приводит к «выпадению» из спектра решений (2) целых областей – стоп-зон. «Внутри» стоп-зоны правая часть (2) комплексна, и акустические волны $\exp[i(k(\omega)x - \omega t)] \sim \exp(-|\mathrm{Im}\, k(\omega)|x)$ проникают в кристалл лишь на глубину порядка длины волны. В этом случае на границах стоп-зоны следует ожидать аномально высоких значений плотности одночастичных фононных состояний

$$\rho_1(\omega) = [V/(2\pi)^3] \times \int dS_{\boldsymbol{k}} / |\nabla_{\boldsymbol{k}}\omega| = (V/2\pi^2) \times k^2 \times |dk/d\omega| \to \infty, \quad (3)$$

где V – объём кристалла, что соответствует сингулярностям типа ван Хова, локализованным в приповерхностном слое (акустические таммовские состояния).

Присутствие легкодоступных поверхностных высокоэнергетических акустических состояний открывает возможности применения фотонных кристаллов в качестве активных «акустических» подложек для гиперкомбинационных (ГКР) исследований в звуковых полях. Результат (3) также перспективен для стимулирования фотон-фононных процессов в материальной среде, что может быть использовано в усиленной спектроскопии вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна (ВРМБ), а также в задачах нелинейной акустооптики.

УДК 535(06)+004(06)

Н.Х. ЧИНЬ[1], С.П. ШЕПЕЛЕВ, Д.А. ШАРИКОВ,
М.П. ПАТАПОВИЧ
Белорусская государственная академия связи, Минск
[1]Университет Винь, Ханой, Вьетнам

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРА РАСФОКУСИРОВКИ СДВОЕННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА СОЗДАНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ НАНОСТРУКТУР, НАПЫЛЁННЫХ НА РАЗЛИЧНЫЕ ВИДЫ ПОВЕРХНОСТИ

Изучена возможность получения наноплёнок на стеклянной и металлической поверхностях. Эксперименты проводились с помощью лазерного двухимпульсного атомно-эмиссионного многоканального спектрометра LSS-1. Данным способом можно получать наноплёнки не только чистых металлов, но и композиционных сплавов.

N.H. TRINH[1], S.P. SHEPELEV, D.A. SHARIKOV, M.P. PATAPOVICH
Belarusian State Academy of Communications, Minsk
[1]Vinh University, Hanoi, Vietnam

STUDYING THE INFLUENCE OF THE DEFOCUSING PARAMETER OF DUAL LASER PULSES ON THE CREATION OF QUALITY NANOSTRUCTURES SPOIRED ON DIFFERENT TYPES OF SURFACES

The possibility of obtaining nanofilms on glass and metal surfaces has been studied. The experiments were carried out using a laser double-pulse atomic emission multichannel spectrometer LSS-1. This method can produce nanofilms not only of pure metals, but also of composite alloys.

Развитие микроэлектроники требует создания качественных наноплёнок, в состав которых могут входить различные химические элементы, например, олово и цинк. В промышленности олово используется в припоях для электроники, в подшипниковых сплавах. Соединения на основе цинка легко свариваются, паяются [1]. Следовательно, для получения наноплёнок на различных видах поверхности (металл либо стекло) возможно использование сдвоенных лазерных импульсов на оловосодержащие поверхности.

Эксперименты были проведены с помощью лазерного двухимпульсного атомно-эмиссионного многоканального спектрометра

LSS-1, характеризующегося возможностью подбора оптимальных условий работы. В частности, параметр расфокусировки может оказывать влияние на количество необходимого элемента в составе полученных наноструктур. Увеличение данного параметра приводит к росту площади лазерного пятна на поверхности образца и к снижению плотности потока излучения. Для иллюстрации возможности напыления частиц на рабочую поверхность был исследован результат воздействия серии лазерных импульсов на мишень [2, 3]. На рис. 1 и 2, в качестве примера, представлено изображение наноплёнки, образованной на стекле и металле. При этом энергия накачке лазера составляла 20 Дж, межимпульсный интервал – 10 мкм, а параметр расфокусировки равнялся 0,5 мм.



Рис. 1. Фотография напылённой на стекло наноплёнки



Рис. 2. Фотография напылённой на металл наноплёнки

В образовании полученных наноструктур наиболее важную роль играют процессы ионизации и рекомбинации ионов, что определяется плотностью потока лазерного излучения и диаметром пятна фокусировки. Кроме того, изменяя количество лазерных импульсов в серии, можно также менять состав и свойства напылённых наноструктур.

Список литературы

1. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. М.: Машиностроение, 1989.

2. Баззал Х., Воропай Е.С., Зажогин А.П., Патапович М.П. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2019. Вып. 11. С. 57-64.

3. Зажогин А.П., Чинь Н.Х., Малец М.А., Патапович М.П. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2022. Вып. 14. С. 602-608.

УДК 535(06)+004(06)

С.В. ГАВРИШ, С.Г. КИРЕЕВ, А.О. ПОТАПЕНКО,
С.Г. ШАШКОВСКИЙ
Научно-производственное предприятие «Мелитта», Москва

ЭРОЗИЯ КВАРЦЕВОЙ ОБОЛОЧКИ ИМПУЛЬСНОЙ КСЕНОНОВОЙ ЛАМПЫ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПЛАЗМЫ И УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ

Приведены результаты исследований процессов изменения прозрачности кварцевой оболочки за счёт теплопроводности сильноточной ксеноновой плазмы и воздействия УФ-излучения при работе импульсной лампы с последовательным зажиганием разряда. Показано, что снизить эрозию кварцевого стекла и увеличить срок службы лампы можно использованием слаботочной вспомогательной дуги, в которой формируется основной разряд.

S.V. GAVRISH, S.G. KIREEV, A.O. POTAPENKO,
S.G. SHASHKOVSKIY
Scientific and Production Enterprise "Melitta", Moscow

EROSION OF THE QUARTZ SHELL OF A PULSE XENON LAMP UNDER INFLUENCE OF PLASMA AND UV RADIATION

The results of studies of the processes of changing the transparency of the quartz shell due to the thermal conductivity of high–current xenon plasma and the effects of UV radiation during the operation of a pulse lamp with sequential discharge ignition are presented. It is shown that it is possible to reduce the erosion of quartz glass and increase the service life of the lamp by using a low-current auxiliary arc in which the main discharge is formed.

Срок службы газоразрядных импульсных ламп определяется временем снижения мощности потока излучения до определенного в нормативных документах уровня. В большинстве случаев снижение светотехнических характеристик обусловлено уменьшением оптической прозрачности (эрозией) кварцевой оболочки *3* (рис. 1) в зоне *L*, которое происходит под воздействием УФ-излучения и тепловых потоков из плазменного канала, сформированного между катодом *1* и анодом *2*.

В данной работе нами установлено, что площадь внутренней поверхности оболочки *3*, подвергшейся эрозии, существенно зависит от условий формирования плазменного канала (последовательный поджиг разряда или наличие вспомогательной слаботочной дуги) и

пространственного расположения лампы по отношению к заземлённым поверхностям *4* (корпус прибора, отражатель и другие). Визуальные наблюдения развития разряда показывают, что в случае последовательного зажигания стример плазменного канала распространяется вдоль стенки кварцевой трубки, расположенной на расстоянии *h* от заземленной плоскости, приводя к азимутальной неравномерности цветности поверхности, подвергшейся эрозии. В месте контакта стримера с кварцевой трубкой *3* наблюдается более значительная плотность жёлтых налётов, чем в остальных областях разрядного объёма. Причина исчезновения прозрачности кварца в этом случае связана с изменением агрегатного состояния приповерхностного слоя оболочки под влиянием тепла, приводящего к разложению оксида кремния и формированию кристобалита, а также с образованием фотоиндуцированных дефектов в стенке оболочки импульсной лампы при воздействии УФ-излучения [1].

Для удаления высокотемпературного плазменного канала от стенки разрядной трубки нами предложено в промежутке между сильноточными импульсами поддерживать горение слаботочного разряда (дежурной дуги) [2]. В результате такого технического решения концентричное формирование основного плазменного столба осуществляется из расположенной по оси лампы дежурной дуги и, как следствие, термоудар на стенку снижается, а интенсивность воздействия УФ-излучения падет за счёт его самопоглощения. В итоге всех выполненных исследований нам удалось на несколько порядков увеличить срок службы лампы (рис. 2).

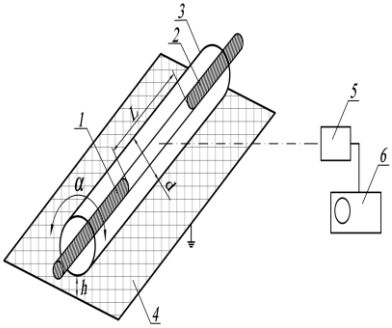


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

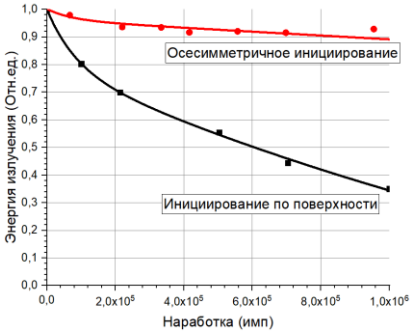


Рис. 2. Срок службы импульсной лампы при различных режимах эксплуатации

Список литературы

1. Герасимова Л.Г., Овчаров А.Т. и др. // Светотехника. 1990. № 5. С. 11-12.
2. Гавриш С.В., Киреев С.Г. // Успехи прикладной физики. 2022. Т. 10. № 1. С. 90 -96.

УДК 535(06)+004(06)

Н.Х. ЧИНЬ[1], Я.С. КОСТРЮКОВА, Ю.В. ТАЛЕРОНОК,
И.С. ЖЕВНЯК, М.П. ПАТАПОВИЧ
Белорусская государственная академия связи, Минск
[1]Университет Винь, Ханой, Вьетнам

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СОЗДАНИЯ ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СДВОЕННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА МИШЕНИ, СОДЕРЖАЩИЕ В СВОЁМ СОСТАВЕ ОЛОВО И МЕДЬ

Изучено влияние расфокусировки лазерного пучка на процессы образования лазерной плазмы при воздействии лазерных импульсов на поверхность мишени в атмосфере воздуха. Исследования проводились с помощью атомно-эмиссионного спектрометра LSS-1. Приведено краткое обсуждение результатов эксперимента.

N.H. TRINH[1], Ya.S. KASTRUKOVA, Yu.V. TALIARONAK,
I.S. ZHAVNIAK, M.P. PATAPOVICH
Belarusian State Academy of Communications, Minsk
[1]Vinh University, Hanoi, Vietnam

RESEARCH OF THE PROCESS OF CREATION OF GAS-SENSITIVE COATINGS UNDER THE INFLUENCE OF DUAL LASER PULSES ON TARGETS CONTAINING TIN AND COPPER

The influence of laser beam defocusing on the processes of laser plasma formation under the influence of laser pulses on the surface of a target in an air atmosphere has been studied. The studies were carried out using an LSS-1 atomic emission spectrometer.

Полупроводниковые сенсоры являются наиболее предпочтительными и перспективными для контроля качества окружающего воздуха. Создание газочувствительных покрытий с улучшенными характеристиками имеют место при использовании композитных материалов. Работа полупроводникового сенсора основана на регистрации изменений сопротивления при воздействии на него измеряемого газа. В состав данных сенсоров могут входить олово и медь, причём как в чистом виде, так и в виде сплавов с другими компонентами [1]. Медь, в частности, меньше алюминия подвержена коррозии и меньше реагирует с водой, что

позволяет применять медные составляющие в системах домашнего отопления. Следовательно, проведение послойного анализа многокомпонентных сплавов сдвоенными лазерными импульсами с целью создания газочувствительных сенсоров является актуальной практической задачей. При проведении исследований использовался лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1, который включает в себя в качестве источника абляции двухимпульсный неодимовый лазер с регулируемыми энергией и интервалом между импульсами, а также возможностью влиять на параметр расфокусировки (модель LS2131 DM). Исследование процессов получения нанoплёнок на различных видах поверхности изучалось по зависимости интенсивности спектральных линий олова и меди от количества воздействующих сдвоенных лазерных импульсов на мишень [2]. Энергия накачки лазера равнялась 20 Дж, интервал между импульсами был 10 мкм, а параметр расфокусировки находился в диапазоне от +2 мкм (положительная расфокусировки) до -2 мкм (отрицательная расфокусировка). В качестве примера, на рис. 1 и 2, представлен внешний вид поверхности образца, полученный с помощью камеры прибора, и послойный анализ исследуемого образца.

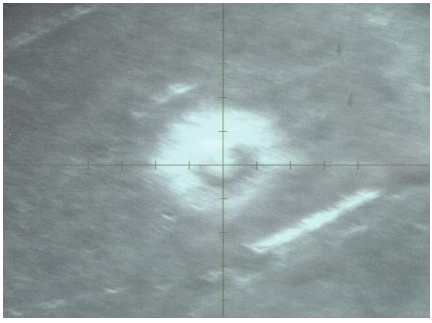


Рис. 1. Фото поверхности исследуемого образца

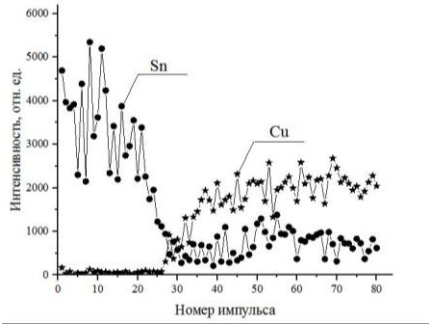


Рис. 2. Зависимость интенсивности линий элементов от номера импульса

Таким образом, подбирая оптимальные условия проведения эксперимента, можно управлять количеством частиц олова и меди в полученных наноструктурах.

Список литературы

1. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. М.: Машиностроение, 1989.

2. Зажогин А.П., Чинь Н.Х., Малец М.А., Патапович М.П. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2022. Вып. 14. С. 602-608.

УДК 535(06)+004(06)

Н.А. ОРЕХОВА[1], А.О. ПУХТЕЕВ[1], Р.А. ХАРИТОНЧИК[1], А.П. ЗАЖОГИН

Белорусский государственный университет, Минск
[1]Средняя школа № 64, Минск, Беларусь

ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ОБРАЗЦА ЖЕЛЕЗНОГО МЕТЕОРИТА МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АТОМНО-ЭМИССИОННОЙ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ

Методом ЛАЭМС изучено распределение железа и никеля в образце железного метеорита. Методом Орнштейна по линиям железа определена температура приповерхностной плазмы при воздействии сдвоенных лазерных импульсов на образцы метеорита и сравнения. Анализ результатов позволяет сделать предположение о наличии в метеорите трёх типов октаэдритов: средне-, грубо- и весьма грубоструктурных.

N.A. AREKHAVA[1], A.O. PUKHTEEV[1], R.A. CHARITONCHIK[1], A.P. ZAJOGIN

Belarussian State University, Minsk
[1]Secondary School No. 64, Minsk, Belarus

STUDYING THE STRUCTURE OF AN IRON METEORITE SAMPLE USING LASER ATOMIC EMISSION MULTICHANNEL SPECTROMETRY

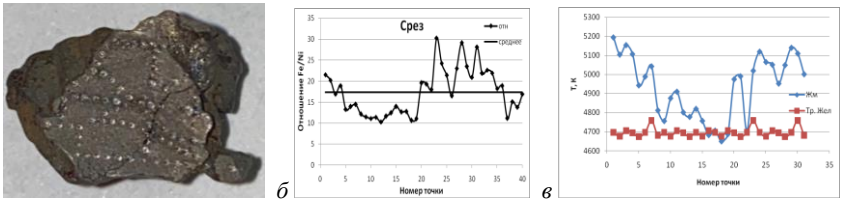
The distribution of iron and nickel in a sample of an iron meteorite was studied using the LAEMS method. Using the Ornstein method, the temperature of the near-surface plasma was determined using iron lines when exposed to dual laser pulses on meteorite samples and comparisons. Analysis of the results allows us to make an assumption about the presence of three types of octahedrites in the meteorite: medium-, coarse- and very coarse-structured.

Современные исследования в области метеоритики, космохимии и планетологии свидетельствуют о существенной роли ударного метаморфизма в формировании и преобразовании космического вещества. Изучение признаков ударного метаморфизма в железных метеоритах позволяет получить сведения о характере структурно-минералогических и химических изменений метеоритного вещества как на ранних этапах

развития малых дифференцированных тел Солнечной системы, так и на современном этапе в результате его дробления и падения на Землю.

Целью настоящей работы являлось изучение структуры железного образца метеорита путём оценки распределения железа и никеля по срезу метеорита и сравнения температуры приповерхностной плазмы образца в сравнении с образцом трансформаторного железа (Тр жел) методом лазерной атомно-эмиссионной спектрометрии. Для анализа использовался лазерный атомно-эмиссионный многоканальный спектрометр LSS-1. Размер пятна фокусировки примерно 50 мкм. Энергия импульсов 35 мДж. Количество сдвоенных импульсов 50. Для анализа использованы интенсивности линий Fe (404,58 и 374,5 нм) и Ni (349,3 нм).

Снимки среза образца с пробитыми точками приведены на рис. 1а. На рис. 1б представлены зависимости отношения интенсивностей линий Fe и Ni в спектрах от номера точки на поверхности среза. На рис. 1в представлены зависимости температуры от номера точки.



а *б* *в*

Рис. 1. Снимок поверхности образца (*а*); отношение интенсивностей линий Fe/Ni в различных частях образца (*б*); температура приповерхностной плазмы (*в*)

Метеориты с валовым содержанием Ni 6 - 16 мас. %, к которым относится исследуемый метеорит, имеют видманштеттенову структуру. Она образована пересекающимися пластинками камасита, ориентированными по плоскостям октаэдра (111) в тэните. Толщина камаситовых балок связанна обратной зависимостью с валовым содержанием Ni и является основой для более детального подразделения октаэдритов на тонко-, средне- и грубо- и весьма грубоструктурные октаэдриты, с примерными размерами балок 0,6, 0,6 - 1,3, 1,3 - 3,3 и более 3,3 мм. В качестве образца сравнения использована пластинка трансформаторного железа, содержащего микрокристаллы железа и кремния. Структура стали анизотропна. В образце сравнения, полученном путём проката, существенных отличий по температуре не наблюдается, что свидетельствует о более-менее однородном распределении по размерам кристаллов.

УДК 535(06)+004(06)

Н.Х. ЧИНЬ[1], Е.В. БОГДАН, С.М. ШАТСКИХ, М.П. ПАТАПОВИЧ
Белорусская государственная академия связи, Минск
[1]Университет Винь, Ханой, Вьетнам

АТОМНО-ЭМИССИОННАЯ МНОГОКАНАЛЬНАЯ СПЕКТРОМЕТРИЯ ДВУХ-, ТРЁХ- И МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СПЛАВОВ

Изучена возможность применения многокомпонентных сплавов и проведён послойный анализ таких соединений при воздействии сдвоенных лазерных импульсов на мишень в атмосфере воздуха. Исследования проводились с помощью атомно-эмиссионного спектрометра LSS-1. Приведено краткое обсуждение результатов эксперимента.

H. TRINH[1], K.V. BOGDAN, S.M. SHATSKIH, M.P. PATAPOVICH
Belarusian State Academy of Communications, Minsk
[1]Vinh University, Hanoi, Vietnam

ATOMIC EMISSION MULTICHANNEL SPECTROMETRY OF TWO-, THREE- AND MULTI-COMPONENT ALLOYS

The possibility of using multicomponent alloys was studied and a layer-by-layer analysis of such compounds was carried out under the influence of dual laser pulses on a target in an air atmosphere. The studies were carried out using an LSS-1 atomic emission spectrometer. A brief discussion of the experimental results is provided.

В современном производстве сплавы применяются значительно шире, чем чистые металлы, так как они обладают более высокой прочностью и твёрдостью, а также являются более износостойкими и жаропрочными [1]. По числу компонентов сплавы делятся на двухкомпонентные (двойные), трёхкомпонентные (тройные) и многокомпонентные. В производстве современного оборудования может широко применяться железо либо в чистом виде, либо как составная часть материала. Следовательно, необходимо улучшать его качества, такие как прочность, эластичность и устойчивость к деформации.

Для этих целей может быть применён метод лазерной атомно-эмиссионной спектрометрии и прибор LSS-1, обеспечивающий воздействие серии сдвоенных лазерных импульсов на исследуемый образец. Для оценки качества такого объекта необходимо изучить зависимость интенсивности спектральных линий химических элементов

от количества воздействующих лазерных импульсов. При этом было учтено влияние параметра расфокусировки, которая достигается механическим перемещением образца вдоль оптической оси спектрометра относительно фокуса лазерного луча [2]. На рис. 1 и 2 представлен внешний вид кратера на поверхности мишени и послойный анализ исследуемого образца, где представлена зависимость интенсивности химических элементов от номера лазерного импульса. При проведении данного эксперимента энергия накачки составляла 20 Дж, межимпульсный интервал соответствовал 10 мкм, а параметр расфокусировки равнялся 1 мм. Таким образом, проведённые спектроскопические исследования лазерной плазмы позволяют констатировать факт возможности контроля и управления её компонентным составом.

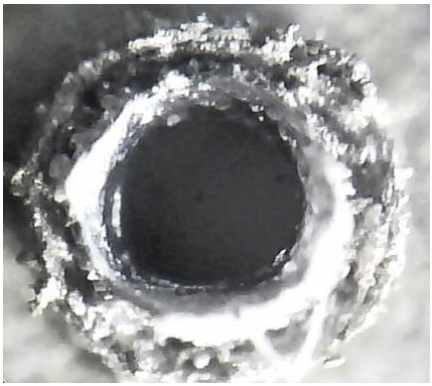


Рис. 1. Внешний вид кратера на поверхности мишени

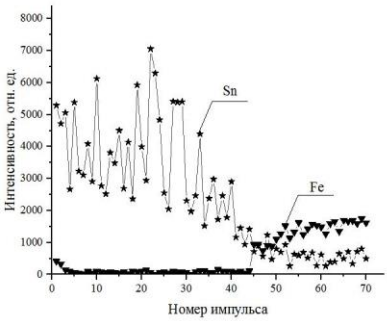


Рис. 2. Послойный анализ исследуемого образца

Таким образом, проведённые спектроскопические исследования лазерной плазмы позволяют констатировать факт возможности контроля и управления её компонентным составом.

Список литературы

1. Samsonov V.M., Sdobnyakov N.Yu. // Central European Journal of Physics. 2003. V. 1. No. 2. P. 334-354.

2. Зажогин А.П., Чинь Н.Х., Малец М.А., Патапович М.П. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2022. Вып. 14. С. 602-608.

УДК 535(06)+004(06)

Н.А. ОРЕХОВА[1], А.О. ПУХТЕЕВ[1], Р.А. ХАРИТОНЧИК[1], А.П. ЗАЖОГИН

Белорусский государственный университет, Минск
[1]Средняя школа № 64, Минск, Беларусь

АНАЛИЗ СОСТАВА КАМЕННОЙ ЧАСТИ МЕТЕОРИТА БРАГИН И ОЛИВИНА МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АТОМНО-ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ

Методом лазерной атомно-эмиссионной спектрометрии проведён сравнительный анализ по основным составляющим состава каменной части фрагмента метеорита Брагин и образца оливина. Установлено, что содержание железа и никеля в Брагине в несколько раз выше. По содержанию магния и кальция они практически мало отличаются.

N.A. AREKHAVA[1], A.O. PUKHTEEV[1], R.A. CHARITONCHIK[1], A.P. ZAJOGIN

Belarussian State University, Minsk
[1]Secondary School No. 64, Minsk, Belarus

ANALYSIS OF THE COMPOSITION OF THE STONE PART OF THE BRAGIN METEORITE AND OLIVINE BY LASER ATOMIC EMISSION SPECTROMETRY

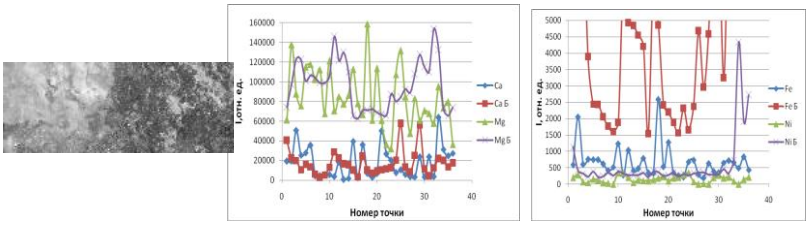
Using laser atomic emission spectrometry, a comparative analysis was carried out on the main components of the composition of the stone part of the fragment of the Bragin meteorite and the olivine sample. It has been established that the iron and nickel content in Bragin is several times higher. In terms of magnesium and calcium content, they differ practically little.

Метеориты были и, несмотря на интенсивное развитие космических исследований, остаются ключевым, а часто и единственным источником информации о протопланетной и ранней планетной истории Солнечной системы. И изучение любого метеорита расширяет наши знания в этом направлении [1 - 4]. В литературе отмечается, что метеорит Брагин, несмотря на то, что он изучается более двухсот лет, до сих пор остается плохо изученным [1]. Самым распространённым минералами в метеорите Брагин являются оливины.

Целью настоящей работы являлось изучение минерального состава каменной части образца Брагинского железо-каменного метеорита и

сопоставление его основного состава с составом кристалла оливина. Оценку локального пространственного и объёмного распределения элементов проводили методом лазерной многоканальной спектрометрии, используя лазерный атомно-эмиссионный многоканальный спектрометр LSS-1. Длительность импульсов ≈ 15 нс. Лазерное излучение фокусируется на образец с помощью ахроматического конденсора с фокусным расстоянием 104 мм. Размер пятна фокусировки примерно 50 мкм. Энергия импульсов 35 мДж.

На рис. 1*а* приведена фотография участка каменной части метеорита. На рис. 1*б* и 1*в* приведено суммарная интенсивность линий в 36 точках (20 импульсов на точку) Mg и Ca, Fe и Ni в указанных точках. Данные для образца Брагин помечены дополнительной буквой Б.



а *б* *в*

Рис. 1. Снимок каменной части метеорита (*а*), интенсивность линий Mg и Ca (*б*), Fe и Ni (*в*) в точках соответственно

При сравнении графиков для Mg и Ca видно, что интенсивности линий элементов в среднем равны для обоих образцов. При сравнении графиков на рис. 1*в* видно существенное отличие по распределению Fe и Ni в образцах. В Брагине каменная часть окружена железо-никелевой оболочкой и часть металлов естественно, при кристаллизации оливина, будет обогащается железом и никелем. Об этом эффекте в частности свидетельствуют крайние точки на графиках. Эти точки являются пограничными между металлической и каменной частью метеорита.

Список литературы

1. Бахтин А.И., Ескин А.А., Сунгатуллин Р.Х. и др. // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2018. Т. 160. Кн. 2. С. 324-338.

2. Buseek P.R. // Geochim. Cosmochim. Acta. 1977. V. 41, No. 6. P. 711-740.

3. Лаврентьева З.А., Люль А.Ю., Колесов Г.М. // Геохимия. 2012. № 1. С. 38-47.

4. Иванов А.В., Ярошевский А.А., Иванова М.А. Минералы метеоритов – новый каталог // Геохимия. 2019. Т. 64. № 8. С. 869-932.

УДК 535(06)+004(06)

Е.И. МАВРЕШКО[1,2], Я.В. УЛЬЯНОВ[1,3], Е.Д. ТАРАКАНОВ[1,3], А.В. РУДЫЙ[1,2]

[1]Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
[2]Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва
[3]Государственный лазерный полигон «Радуга», Радужный, Владимирская обл.

ОТЕЧЕСТВЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЛАЗЕРНОЙ КЕРАМИКИ

Общемировой опыт показывает, что монокристалл отходит на второй план, и появляется лазерная керамика, которая позволяет существенно улучшить показатели лазерных систем при тех же массогабаритных параметров. Государственный лазерный полигон «Радуга» и ФИРЭ им. В.А. Котельникова разработали линию по производству прозрачной лазерной керамики, продемонстрировав технологии синтеза, формования, спекания, обработки и нанесения покрытий для оптимального контроля качества.

E.I. MAVRESHKO[1,2], Ya.V. ULYANOV[1,3], E.D. TARAKANOV[1,3], A.V. RUDIY[1,2]

[1]National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)
[2]Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow
[3]State Laser Polygon "Raduga", Raduzhnyi, Vladimir region

DOMESTIC LASER CERAMIC PRODUCTION TECHNOLOGY

Global experience shows that the single crystal is fading into the background, and laser ceramics are appearing, which can significantly improve the performance of laser systems with the same weight and size parameters. The State Laser Polygon "Raduga" and the V.A. Kotelnikov IRE of the RAS developed a production line for transparent laser ceramics, showcasing synthesis, molding, sintering, processing, and coating technologies for optimal quality control.

В современных твердотельных лазерных системах в качестве активного компонента преимущественно используются монокристаллы. Однако наблюдается глобальный отход от монокристаллов, и многообещающей альтернативой становится лазерная керамика. Лазерная керамика открывает потенциал для повышения производительности лазерных систем с эквивалентными массогабаритными параметрами или позволяет создавать совершенно новые лазерные системы, которые были непрактичны с монокристаллами.

Керамическая технология обеспечивает гибкий дизайн на макро-, микро- и молекулярном уровнях. Эта универсальность открывает различные возможности для разработки мощных лазеров, которые ранее были недостижимы с помощью обычных монокристаллов. Например, можно создавать композитные структуры и повышать атомную концентрацию легирующих элементов (например, редкоземельных элементов группы лантаноидов), улучшая тем самым генерационные характеристики выходного излучения лазера. Оптические свойства активных элементов в лазерной керамике в настоящее время сравнимы со свойствами монокристаллов. [1] Кроме того, лазерные системы на основе керамики предлагают ценовые преимущества с точки зрения производства активных элементов по сравнению с монокристаллами.

Государственный лазерный полигон «Радуга» совместно с Фрязинским филиалом Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН успешно разработал и внедрил линию по производству высокопрозрачной лазерной керамики (рис. 1), в том числе композитов (рис. 2). [2, 3] Технология изготовления керамических оптических материалов включает несколько основных операций: синтез исходных порошков, формование для достижения заданной формы и размеров, спекание или термообработку давлением, механическую обработку для придания формы оптической детали, нанесение защитных и просветляющих покрытий. Строгие меры контроля качества применяются для обеспечения превосходного качества конечного продукта.



Рис. 1. Образец высокопрозрачной лазерной нанокерамики (ВПЛК)



Рис. 2. Образец высокопрозрачная композитная лазерная керамика (ВПКЛК) Nd:YAG/Cr:YAG

Список литературы

1. Ikesue A., Aung Y.L. // J. Am. Ceram. Soc. 2006. V. 89 (6). P 136-1944.

2. Bezotosnyi V.V., Balashov V.V., Bulaev V.D., et al. // Quantum Electronics. 2018. V. 48 (9). P. 802-806.

3. Bezotosnyi V.V., Cheshev E.A., Gordeev V.P., et al. // J. Russ. Laser Res. 2019. V. 40 (3). P. 237-242.

А.В. РУДЫЙ[1,2], Я.В. УЛЬЯНОВ[1,3], Е.Д. ТАРАКАНОВ[1,3], Е.И. МАВРЕШКО[1,2]

[1]Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
[2]Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва
[3]Государственный лазерный полигон «Радуга», Радужный, Владимирская обл.

АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ИСХОДНЫХ ОБРАЗЦОВ ИТТРИЙ-АЛЮМИНИЕВОЙ ЛАЗЕРНОЙ КЕРАМИКИ, ЛЕГИРОВАННОЙ Nd^{3+}:YAG

ГЛП «Радуга» провёл оценку отечественной лазерной керамики Nd^{3+}:YAG. С помощью волоконного лазера были определены полные потери в активных элементах, рассчитаны коэффициенты пропускания и потерь. Качество покрытия оценивалось по коэффициентам отражения на длине волны 1,07 мкм, показавшим приемлемые значения для элементов Nd^{3+}:YAG. Расчёты коэффициента пассивных потерь показали, что концентрация неодима 2 % привела к значительно меньшим потерям, что указывает на превосходное качество.

A.V. RUDIY[1,2], Ya.V. ULYANOV[1,3], E.D. TARAKANOV[1,3], E.I. MAVRESHKO[1,2]

[1]National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)
[2]Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow
[3]State Laser Polygon Raduga, Raduzhnyi, Vladimir region

ANALYSIS AND EVALUATION OF Nd^{3+}:YAG DOPED YTTRIUM ALUMINUM LASER CERAMICS INITIAL SAMPLES

SLP “Raduga” evaluated domestically produced Nd^{3+}:YAG laser ceramics. Using fiber laser, total losses in active elements were determined, calculating transmittance and loss coefficients. Coating quality was assessed via reflection coefficients at 1.07 μm wavelength, showing acceptable values for Nd^{3+}:YAG elements. Passive loss coefficient calculations revealed that 2 % neodymium concentration led to significantly lower losses, indicating superior quality.

В ходе серии экспериментов на Государственном лазерном полигоне «Радуга» было оценено качество отечественной лазерной керамики Nd^{3+}:YAG [1]. Полные потери в образцах активных элементов определялись с помощью волоконного лазера ЛК-100-ЛП-ОМ-В [2]. Для каждого активного элемента Nd^{3+}:YAG были проведены эксперименты по

измерению мощности излучения иттербиевого лазера до и после прохождения через активный элемент, как представлено на рис. 1. Были рассчитаны коэффициенты пропускания и общих потерь, получив средние значения с приемлемыми запасами [3].

Оценка качества нанесённых покрытий на торцах элементов основывалась на предыдущей работе [2]. Коэффициент отражения, отражающий качество покрытий, рассчитывался путём измерения мощности включённого и отражённого от торца активного элемента лазерного излучения на длине волны 1,07 мкм. Результаты для активных элементов Nd^{3+}:YAG показали средние коэффициенты отражения с приемлемыми значениями с учётом погрешности.

Определение коэффициента пассивных потерь основывалось на предыдущих исследованиях [4]. Расчёт коэффициента пропускания излучения на границе среды позволил определить полные потери и коэффициент пассивных потерь. Примечательным открытием было то, что концентрация неодима 2 % в керамике Nd^{3+}:YAG привела к более чем в три раза меньшим общим потерям и коэффициентам пассивных потерь по сравнению с образцом с содержанием неодима 1 %. Коэффициент пропускания активного элемента с содержанием неодима 2 % превышал коэффициент пропускания образцов с содержанием неодима 1 % на 0,1, что указывает на превосходное качество при меньших оптических потерях.

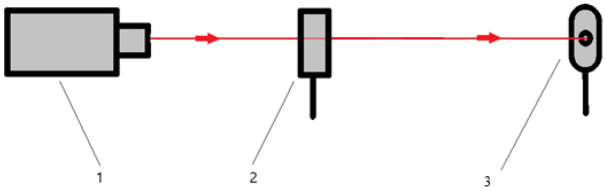


Рис. 1. Схема установки для измерения мощности излучения лазера: *1* – иттербиевый волоконный лазер ЛК-100-ЛП-ОМ-В; *2* – диафрагма со светофильтрами; *3* – измерительная головка OPHIR 3A КТ2017011-1-28

Список литературы

1. Ikesue A., Aung Y.L. // J. Am. Ceram. Soc. 2006. V. 89 (6). P 136-1944.

2. Bezotosnyi V.V., Balashov V.V., Bulaev V.D., et al. // Quantum Electronics. 2018. V. 48 (9). P. 802-806.

3. Bezotosnyi V.V., Cheshev E.A., Gordeev V.P., et al. // J. Russ. Laser Res. 2019. V. 40 (3). P. 237-242.

Я.В. УЛЬЯНОВ[1,2], Е.Д. ТАРАКАНОВ[1,2], А.В. РУДЫЙ[1,3], Е.И. МАВРЕШКО[1,2]

[1]Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
[2]Государственный лазерный полигон «Радуга», Радужный, Владимирская обл.
[3]Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ КОМПОЗИТНОЙ КЕРАМИКИ Nd^{3+}:YAG/Cr^{4+}:YAG ДЛЯ КОМПАКТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ЛАЗЕРОВ С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ

В данной работе представлены исследования генерационные характеристики двух образцов микро-чип лазеров на основе композитной керамики Nd^{3+}:YAG/Cr^{4+}:YAG и одного кристаллического образца, изготовленного методом диффузионной сварки. Показано, что генерационные характеристики керамических незначительно уступают кристаллическому. Вероятно, это обусловлено спецификой работы керамических затворов Cr^{4+}:YAG.

Ya.V. ULYANOV[1,2], E.D. TARAKANOV[1,2], A.V. RUDIY[1,3], E.I. MAVRESHKO[1,3]

[1]National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)
[2]State Laser Polygon "Raduga", Raduzhnyi, Vladimir region
[3]Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

EXPLORATION OF DOMESTIC Nd^{3+}:YAG/Cr^{4+}:YAG COMPOSITE CERAMICS FOR COMPACT PULSED LASERS WITH DIODE PUMPING

This paper presents studies of the lasing characteristics of two samples of micro-chip lasers based on Nd^{3+}:YAG/Cr^{4+}:YAG composite ceramics and one crystalline sample manufactured by diffusion welding. It has been shown that the lasing characteristics of ceramic ones are slightly inferior to crystalline ones. This is probably due to the specific operation of Cr^{4+}:YAG ceramic gates.

Лазерная керамика представляет собой весьма перспективный материал для лазеров, превосходя кристаллические среды по ряду показателей, в частности по эффективности. Примечательно, что технология производства керамики более эффективна, чем выращивание монокристаллов, что позволяет создавать крупные керамические элементы, необходимые для мощных лазеров. Современные технологии позволяют производить керамические элементы рекордных размеров, что

делает их незаменимыми. Кроме того, керамика облегчает создание композитных активных сред с такими функциями, как пассивные затворы, голографические решётки и волноводные каналы, что обеспечивает гибкость топологии керамических элементов. Таким образом, исследования лазеров с диодной накачкой на основе композитной керамики весьма актуальны.

Государственный лазерный полигон «Радуга» и Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН разработали линию по производству высокопрозрачной лазерной керамики, в том числе композитов. В настоящей работе представлены результаты экспериментов по изучению лазерных характеристик двух отечественных образцов микрочипового лазера с использованием композитной керамики Nd^{3+}:YAG/Cr^{4+}:YAG (рис. 1) и одного кристаллического образца, полученного методом диффузионной сварки.

Хотя генерационные характеристики керамических образцов незначительно отстают от кристаллических образцов, это различие можно объяснить спецификой работы керамических затворов Cr^{4+}:YAG. Тем не менее, исследования показывают, что относительная эффективность исследованных образцов лазеров на керамических микрочипах остается сравнимой с кристаллическими. Таким образом, задача создания таких микрополостей сводится к выбору оптимальной конструкции.

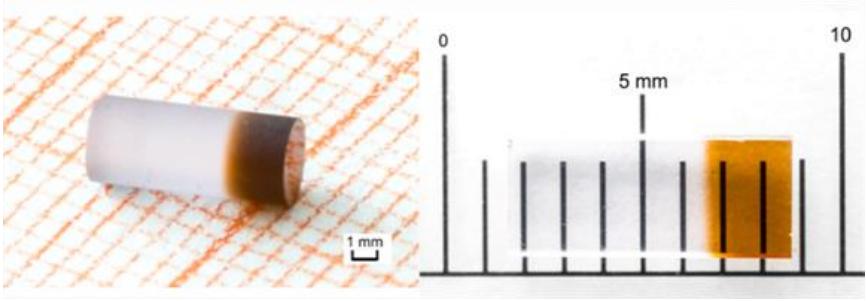


Рис. 1. Внешний вид образца композитной лазерной керамики

Список литературы

1. Bezotosnyi V.V., Balashov V.V., Bulaev V.D., et al. // Quantum Electronics. 2018. V. 48 (9). P. 802-806.

Е.Д. ТАРАКАНОВ[1,2], Я.В. УЛЬЯНОВ[1,2], А.В. РУДЫЙ[1,3],
Е.И. МАВРЕШКО[1,3]

[1]Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
[2]Государственный лазерный полигон «Радуга», Радужный, Владимирская обл.
[2]Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ Nd^{3+}:YAG-КЕРАМИКИ НА ГОСУДАРСТВЕННОМ ЛАЗЕРНОМ ПОЛИГОНЕ «РАДУГА»

В ходе исследования на Государственном лазерном полигоне «Радуга» была оценена лазерная керамика Nd^{3+}:YAG, использующая продольную схему накачки для оптимального резонанса. При использовании лазерного диода FocusLight образцы отечественной лазерной керамики сравнивали с эталоном Konoshima Chemical Co. Ltd.. Остаточная концентрация пор в керамическом образце была ниже, чем в эталоне Konoshima Chemical Co. Ltd., что указывает на благоприятное качество.

E.D. TARAKANOV[1,2], Ya.V. ULYANOV[1,2], A.V. RUDIY[1,3],
E.I. MAVRESHKO[1,3]

[1]National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)
[2]State Laser Polygon "Raduga", Raduzhnyi, Vladimir region
[3]Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

EFFICIENCY STUDY OF Nd^{3+}:YAG CERAMICS AT STATE LASER POLYGON "RADUGA"

A study at the State Laser Polygon "Raduga" evaluated Nd^{3+}:YAG laser ceramics using a longitudinal pumping pattern for optimal resonance. Using the FocusLight laser diode, samples of domestic laser ceramics were compared with the Konoshima Chemical Co. standard. Ltd. The residual pore concentration in the ceramic sample was lower than that of the Konoshima Chemical Co. reference. Ltd., which indicates favorable quality.

При исследовании Nd^{3+}:YAG-лазерной керамики Государственного лазерного полигона «Радуга» использовалась продольная схема накачки, оптимизирующая резонанс с пучком диодной накачки в полуконфокальной конфигурации резонатора. Лазерный диод FocusLight (808 нм, мощность до 10 Вт) поддерживал контролируемую температуру поглощения ионов Nd при длине волны 808,5 нм. Режим QCW снижает тепловые эффекты, а мощность излучения накачки измеряется калориметрическим измерителем мощности лазерного излучения Gentec.

Эффективность генерации, определенная по соотношению выходной мощности к поглощённой мощности накачки, показала, что керамический образец 1 (ФКП «ГЛП Радуга») соответствовал керамике Nd^{3+}:YAG от Konoshima Chemical Co. Ltd., тогда как образец 2 имел пониженную эффективность, что связано с плохой накачкой (рис. 1). Согласование луча с диаметром основной моды. Измерения порога генерации были проведены для всех предоставленных образцов активных элементов.

С точки зрения качества лазерной керамики, оценивая потери из-за рассеяния на остаточных порах, можно утверждать, что концентрация остаточных пор в керамике активного элемента 1 ниже, чем в эталонном образце от Konoshima Chemical Co. Ltd. На элементы 2 и 3 повлияли ошибки проектирования, о чём свидетельствуют измеренные пороговые значения их генерации. Этот вывод согласуется с оперативными проблемами, наблюдаемыми в этих элементах.

Исследование показало важность схем продольной накачки для оптимального резонанса и влияние конструктивных соображений на эффективность генерации и пороговые измерения. Это подчеркивает конкурентоспособность керамического образца 1 по сравнению с установленным эталоном и определяет области для улучшения образцов 2 и 3, способствуя всестороннему пониманию лазерной керамики, производимой Государственным лазерным полигоном «Радуга».

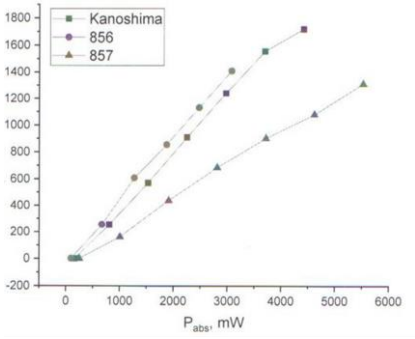


Рис. 1. Измеренные зависимости мощности излучения лазеров с исследуемыми образцами активных элементов от величины, поглощённой в активном элементе мощности накачки

Список литературы

1. Bezotosnyi V.V., Balashov V.V., Bulaev V.D., et al. // Quantum Electronics. 2018. V. 48 (9). P. 802-806.

В.Е. ПРИВАЛОВ, В.Г. ШЕМАНИН[1]
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
[1]Новороссийский политехнический институт (филиал)
Кубанского государственного технологического университета

ЛАЗЕРЫ: ИЗМЕРЕНИЯ, ИНФОРМАЦИЯ, ЭНЕРГЕТИКА

Лазерные гетеродинные методы широко внедрены в измерительную технику, а сами лазеры входят в состав первичных эталонов единиц частоты, длины, угла, температуры, другие звенья поверочных схем различных физических величин и постоянно расширяют области своего применения. Лидарными методами можно обнаруживать места выхода водорода на поверхность Земли и производство заменить добычей водорода из скважин с последующей очисткой тоже с помощью лазеров. Эти свойства лазера позволяют ему проникнуть вслед за измерениями и информатикой в энергетику.

V.E. PRIVALOV, V.G. SHEMANIN[1]
Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University
[1]Novorossiysk Polytechnic Institute (branch) of Kuban State Technological University

LASERS: MEASUREMENTS, INFORMATION, ENERGY

Laser heterodyne methods are widely implemented in measuring equipment and the lasers themselves are part of the primary standards of units of frequency, length, angle, temperature, other links of verification schemes of various physical quantities and are constantly expanding their fields of application. The lidar methods can detect the places where hydrogen escapes from the surface of the Earth and can replace production with hydrogen extraction from wells with subsequent purification also using lasers. These properties of the lasers allow it to penetrate into the energy industry following measurements and information/

В настоящее время наиболее точными являются частотные измерения. Поэтому лазерные гетеродинные методы широко внедрены в измерительную технику. Лазеры входят в состав первичных эталонов единиц частоты, длины, угла, температуры, другие звенья поверочных схем различных физических величин и постоянно расширяют области своего применения. Высокая когерентность лазерного излучения способствует применению лазеров в системах связи и других областях измерительной техники и информатики (например, [1 - 4]).

Высокая точность измерений, которые обеспечивают лазеры открывают новые возможности не только в измерительной технике и информатике. Интерес к водородной энергетике поставил вопрос о производстве водорода. Самый чистый водород получается при разложении воды. Это энергетически нецелесообразно. Выход всегда есть. С помощью лидаров можно обнаруживать места выхода водорода на поверхность Земли и производство заменить добычей водорода из скважин с последующей очисткой тоже с помощью лазеров [5].

В последнем случае вырисовывается цепочка, в которой свойства лазеров позволяют им проникнуть вслед за измерениями и информатикой в энергетику. Этому и посвящена настоящая работа.

Для обнаружения молекул водорода в атмосфере на небольших расстояниях зондирования порядка 100 м может использоваться лидар комбинационного рассеяния света, а для расстояний порядка единиц километров – потребуется лидар дифференциального поглощения и рассеяния в ИК-области спектра [4].

Список литературы

1. Долгих Г.И., Привалов В.Е. Лазеры. Лазерные системы. Владивосток: Дальнаука, 2009.

2. Привалов В.Е., Фотиади А.Э., Шеманин В.Г. Лазеры и экологический мониторинг атмосферы. С.-Пб.: Лань, 2013.

3. Долгих Г.И., Привалов В.Е. Лазерная физика. Фундаментальные и прикладные исследования. Владивосток: Изд-во «Рея», 2016.

4. Привалов В.Е., Фотиади А.Э., Шеманин В.Г. Лазерное зондирование молекулярного водорода. С.-Пб.: Политех-Пресс, 2023.

5. Привалов В.Е. // Труды 26 Межд. конф. «Лазерно-измерительные технологии». Новороссийск, 2018. С. 40.

К.А. ЗАГОРУЛЬКО[2], А.В. КОЗЛОВ[1], Ф.А. УШАКОВ[1,2],
А.Р. ГАТАТДИНОВ[1,2], Н.П. ХАТЫРЕВ[2]
[1]Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
[2]Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Московская обл.

ИССЛЕДОВАНИЯ АМПЛИТУДНЫХ ШУМОВ ОДНОЧАСТОТНЫХ ЛАЗЕРОВ

Выполнены экспериментальные исследования амплитудных шумов одночастотных лазеров различного типа в диапазоне частот отстройки от 10 Гц до 10 ГГц. с учётом амплитудно-частотных характеристик измерительной системы. Измерены значения относительных шумов интенсивности до уровня дробовых шумов, минимальный из которых составил -170 дБн/Гц.

K.A. ZAGORULKO[2], A.V. KOZLOV[1], F.A. USHAKOV[1,2],
A.R. GATATDINOV[1,2], N.P. KHATYREV[2]
[1]National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)
[2]Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering, Mendeleevo, Moscow region

RELATIVE INTENSITY NOISE MEASUREMENT OF SINGLE-FREQUENCY LASERS

Experimental studies of amplitude noise of single-frequency lasers of various types in the frequency range from 10 Hz to 10 GHz have been carried out taking in account the amplitude-frequency characteristics of the measuring system. The values of relative noise intensity were measured to the level of shot noise, the minimum of which was about -170 dBc/Hz.

Для многих приложений важной характеристикой одночастотных лазеров (ОЧЛ) является относительный шум интенсивности (Relative Intensity Noise – RIN [1]). Хотя методики измерения RIN известны, серийно выпускаемые полупроводниковые лазеры (ПЛ) с распределённой обратной связью (Distributed Feedback – DFB) могут иметь RIN на уровне 165 дБн/Гц, что затрудняет измерение этой характеристики. Кроме того, для всех элементов схемы измерений необходима калибровка амплитудно-частотных характеристик (АЧХ), что представляет из себя отдельную задачу. В работе измерены шумы двух одночастотных DFB ПЛ, DFB волоконных NKT Koheras BASIK и Precilasers, ПЛ с внешним

резонатором (External Cavity Diode Laser – ECDL) RIO ORION и ITLA (Integrable Tunable Laser Assembly) с учётом АЧХ измерительной системы. Измерения проведены в соответствии со стандартной схемой [1].

Для проведения измерений в диапазоне частот отстроек до 100 МГц использовался модифицированный (с расширением полосы в сторону малых частот путём добавления ёмкости) Bias-Tee (BT) ZFBT-6GW+ (0.1 - 6000 МГц). Для частот более 100 МГц использовался стандартный BT ZX85-12G-S+ (0.2 - 12000 МГц). Для проведения измерений в диапазоне частот отстройки до 8 ГГц применялся Rohde & Schwarz (R&S) FSWP-8, при больших частотах R&S FSW-50. Для каждого диапазона частот проводилась калибровка. На частотных до 1 МГц использовался сигнал полупроводникового лазера с модуляцией по току, на больших частотах сигнал биений двух волоконных лазеров. Во всех экспериментах использовался фотоприёмник с полосой до 20 ГГц и откликом 0.5 А/Вт. При модуляции полупроводникового лазера опорный сигнал без влияния BT был получен на осциллографе (так как есть возможность подачи постоянного тока). Для сигнала биений опорный сигнал рассчитывался аналитически. Для каждого диапазона получена калибровочная кривая, которая прибавлялась к результатам измерений, чтобы компенсировать суммарное влияние АЧХ фотоприёмника, BT и измерительного прибора. Результаты измерения RIN лазеров представлены на рис 1.

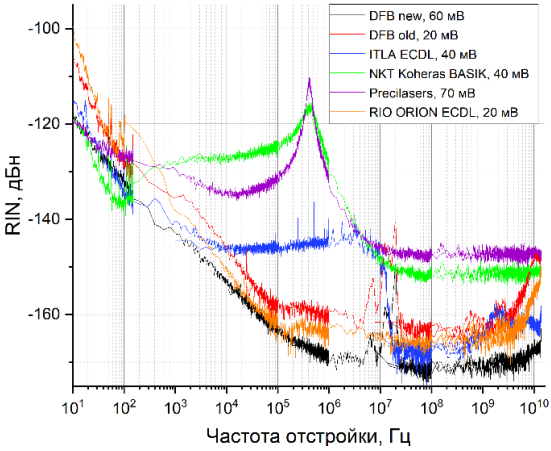


Рис. 1. Результаты измерений RIN

Список литературы

1. Urick V.J., Devgan P.S., et al. // Naval Reasearch Laboratory, DC. 2007. P. 20375-5320.

УДК 535(06)+004(06)

Е.П. ТЕТЕРИН, С.А. АНИСИМОВА
Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева, Владимирская обл.

ВЛИЯНИЕ «ФАНТОМНОГО» ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ИЗЛУЧЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА

Приведены результаты экспериментов по изменению параметров выходного излучения полупроводникового лазера, помещённого в «фантомное» электромагнитное поле. Обнаружено изменение модового состава излучения и увеличение расходимости лазерного луча на 16 %.

E.P. TETERIN, S.A. ANISIMOVA
Kovrov State Technological Academy named after V.A. Degtyarev, Vladimir region

THE EFFECT OF A "PHANTOM" ELECTROMAGNETIC FIELD ON THE RADIATION OF A SEMICONDUCTOR LASER

The results of experiments on changing the parameters of the output radiation of a semiconductor laser placed in a "phantom" electromagnetic field are presented. A change in the mode composition of the radiation and an increase in the divergence of the laser beam by 15 % were detected.

В течении ряда лет авторы занимаются исследованиями свойств электромагнитных полей, создаваемых катушками специальной формы. Локализованное вблизи такой катушки поле, возникнув, регистрируется и после выключения генератора, к которому подключена катушка, в течение достаточно длительного времени. Этот эффект получил название «фантомного» поля. «Фантомное» поле оказывает воздействия на системы, находящиеся в метастабильном или неравновесном состоянии. В частности, помещение в него полупроводникового лазера привело к изменению расходимости лазерного луча, изменению создаваемой им интерференционной картины и модового режима.

Нами был проведён эксперимент по оценке расходимости излучения полупроводникового лазера вне фантома и внутри фантома (рис. 1). Оценка расходимости пучка лазерного излучения основано на регистрации распределения интенсивности излучения по поперечному сечению пучка на экране. Ширина пучка определялась на высоте *1/e* от максимального значения. При работе лазера внутри фантома диаметр пучка увеличился на 15,9 %.

Был проведён эксперимент по изучению интерференционной картины двух полупроводниковых лазеров вне и внутри фантома (рис. 1).

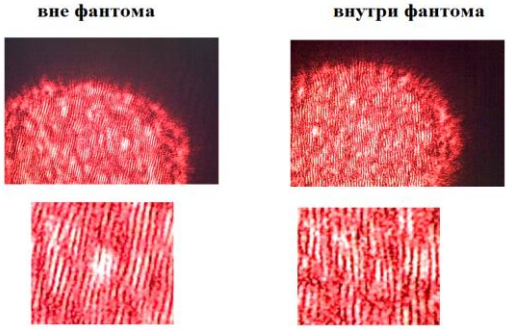


Рис. 1. Интерференционные картины от двух полупроводниковых лазеров вне и внутри фантома, снятые цифровым микроскопом с увеличением 200.

Результаты измерений показали, что ширина интерференционной полосы увеличилась на 10,1 % для лазеров внутри фантома по сравнению с шириной полосы для лазеров вне фантома. На рис. 2 представлены графики распределения интенсивности лазерного луча лазера, находящегося внутри и вне «фантомного» поля.

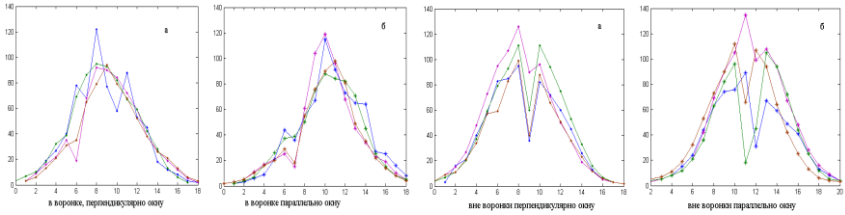


Рис. 2. Распределение интенсивности по поперечному сечению лазерного луча: первые два графика – лазер в «фантомном» поле в двух взаимноперпендикулярных направлениях, вторые два графика – лазер вне фантомного поля в тех же направлениях

Из графиков видно, что вне «фантомного» поля лазер находится в двухмодовом режиме, а внутри – в одномодовом из-за поглощения «фантомным» полем порядка 10 % интенсивности лазерного излучения.

УДК 535(06)+004(06)

В.С. МАКИН, Р.С. МАКИН[1]
Научно-проектный центр Оптоэлектронных комплексов наблюдения – филиал АО «Корпорация «Комета», Санкт-Петербург
[1]Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ПОЛЯРИТОННАЯ МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ СУПРАВОЛНОВЫХ СТРУКТУР АНОМАЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИИ НА ПОЛУПРОВОДНИКАХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Предложена модель образования суправолновых решёток аномальной ориентации на поверхности полупроводника под действием серии УКИ-импульсов поляризованного лазерного излучения. Показано, что периоды суправолновых структур квантованы и подчиняются последовательности порядка Шарковского. Теоретическая модель подтверждена экспериментами, выполненными с использованием наносекундного и УКИ-излучения на кремнии.

V.S. MAKIN, R.S. MAKIN[1]
Scientific and Design Center for Optoelectronic Observation Complexes – Branch of JSC "Kometa Corporation", Saint-Petersburg
[1]National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

POLARITON MODEL FOR SUPRAWAVELENGTH ANOMALOUSLY ORIENTED STRUCTURES FORMATION ON SEMICONDUCTORS BY LASER RADIATION

The model for suprawavelength gratings of anomalous orientation on semiconductor's surface under series of ultra-short laser pulses action was suggested. It was shown that the periods of suprawavelength structures are quantized and follow the sequence of Sharkovsky order. The theoretical model was confirmed by experiments with nanosecond and ultra-short laser radiation on silicon.

Механизм образования суправолновых структур (СС) аномальной ориентации был предложен в [1] для металлов и связан с взаимной интерференцией поверхностных плазмон поляритонов (ППП), при росте интенсивности их возбуждения на резонансном рельефе $\mathbf{g}\|\mathbf{E}$ повышенной глубины. В обычной геометрии эксперимента локальные решётки $\mathbf{g}$ оказываются локально не строго параллельны направлению вектора напряжённости электрического поля $\mathbf{E}$ лазерного излучения, что связано с отклонением от $\mathbf{E}$ направлений наиболее эффективного возбуждения ППП

(на малый угол δφ). При увеличении глубины решётки **g** интенсивность возбуждаемых ППП оказывается достаточной для осуществления конструктивной интерференции пар ППП с различными величинами $\delta\varphi_1$ и $\delta\varphi_2$, направления распространения которых пространственно перекрываются. Их интерференция приводит к образованию новых решёток **G**, ориентация которых **G**⊥**E**, а период, определяемый углом между направлениями их распространения, изменяется в диапазоне ~ (1.5 - 3)λ. Величина D периода решётки **G**, как показывают данные экспериментов [2], принимает квантованные (дискретные) значения, пропорциональные λ. Эти суправолновые периоды (D), хорошо описываются в рамках нелинейной математической модели (НММ) формирования пространственных периодов структур [2 - 4], а именно порядком Шарковского. В рассмотренной модели величина $D \propto \lambda$,что подтверждается данными экспериментов [2 - 4]).

В работе [2] по краю области образования период структур на кремнии составлял $D = 9\lambda/4\xi \approx 1.66$ μm, $\xi \approx 1.08$, а в центре – $D = 3\lambda/\xi \approx 2.3$ μm, $\xi \approx 1.04$ ($\lambda = 800$ нм. $\tau = 35$ фс, $Q = 0.7$ Дж/см^2, $N = 200$). В [3] на поверхности плёнки кремния при воздействии серии УКИ-импульсов ($\lambda = 775$ нм) были обнаружены, с ростом величины Q, структуры **G** с идентифицированными нами теоретическими периодами $4\lambda/\xi$, $5\lambda/\xi$, $6\lambda/\xi$, $7\lambda/\xi$, $9\lambda/\xi$, $12\lambda/\xi$, принадлежащими последовательности порядка Шарковского.

Предложенная нами модель взаимной интерференции ППП в рамках НММ хорошо объясняет образование квантованных суправолновых структур аномальной ориентации на полупроводниках, а не только на металлах [1].

Список литературы

1. Макин В.С., Макин Р.С. // Письма в ЖТФ. 2023. Т. 49. № 21. С. 33-37.
2. Nivas J.J.J., Amoruso S. // Nanomaterials. 2020. V. 11. P. 174.
3. Li S., Yang D., Nikumb S. // Applied Surface Science. 2007. V. 254. P. 2996-3005.
4. Ren Y., Zhang Z. // Optics Express. 2021. V. 29. № 21. P. 33804-33817.

УДК 535(06)+004(06)

Е.С. ВОРОПАЙ, М.Н. КОВАЛЕНКО, Н.А. АЛЕКСЕЕНКО[1], А.П. ЗАЖОГИН

Белорусский государственный университет, Минск
[1]Институт порошковой металлургии, Минск, Беларусь

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ СОСТАВА ЛАЗЕРНОГО ФАКЕЛА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СДВОЕННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ДВУХСЛОЙНЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МИШЕНИ В АТМОСФЕРЕ ВОЗДУХА

Исследованы процессы образования смешанных нанопорошков из оксидов Al и Cu при воздействии сдвоенных лазерных импульсов на гибридные мишени, состоящие из пластинок сплавов алюминия и меди, склеенных между собой в разных порядках следования. Показано, что лучшие условия формирования состава лазерного факела для получения смешанных нанопорошков алюминатов меди обеспечиваются при следовании пластинок Al + Cu.

E.S. VOROPAY, M.N. KOVALENKO, N.A. ALEKSEENKO[1], A.P. ZAJOGIN

Belarussian State University, Minsk
[1]SSI «Powder Metallurgy Institute», Minsk, Belarus

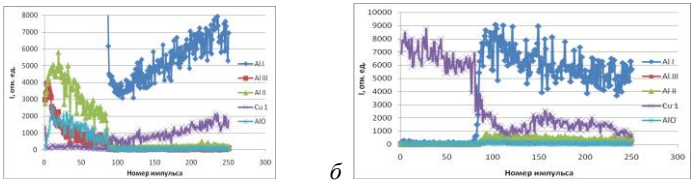
FEATURES OF THE PROCESSES FOR FORMING THE COMPOSITION OF A LASER TORCH UNDER THE INFLUENCE OF DUAL LASER PULSES ON DOUBLE-LAYER METAL TARGETS IN THE AIR ATMOSPHERE

The processes of formation of mixed nanopowders from Al and Cu oxides under the influence of dual laser pulses on hybrid targets consisting of aluminum and copper alloy plates glued together in different sequence orders have been studied. It has been shown that the best conditions for forming the composition of a laser torch to obtain mixed copper aluminate nanopowders are provided when following Al + Cu plates.

Алюминат меди $CuAlO_2$ является полупроводником, прозрачным для видимого света. $CuAlO_2$ имеет широкую полосу пропускания ~ 3,5 эВ. Несмотря на значительное количество работ по изучению методов синтеза алюминатов меди, отработка методик получения нанопорощков-прекурсоров для синтеза нанокерамик $CuAlO_2$ остается актуальной задачей.

Цель работы состояла в том, чтобы изучить особенности формирования состава лазерного факела при получения смешанных нанопорошков Al, оксидов Cu и Al методом абляции сериями сфокусированных сдвоенных лазерных импульсов двухслойных мишеней состоящих из последовательно установленных алюминиевой и медной пластинок или в обратном порядке в воздушной атмосфере для использования в технологиях получения нанокерамик типа $Cu_xAl_{1-x}O_2$. Образование нанопорошков $CuAlO_2$ происходит за счёт реакции слипания различных оксидов Al и Cu. Для проведения исследований использовали лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1.

На рис. 1*а* в качестве примера, представлены результаты по зависимости интенсивности линий атомов Al и Cu, ионов Al и полос AlO от количества импульсов. Энергия импульсов 53 мДж, межимпульсный интервал 10 мкс.



а *б*

Рис. 1. Зависимости интенсивности линий атомов Al I (394,409 нм), Cu 1 (510,554 нм), ионов Al III (452,918 нм), Al II (466,305 нм) и полос AlO (484,5 нм) в спектрах от порядка установки пластинок: Al+Cu (*а*); Cu+Al (*б*)

Как видно из анализа графиков порядок установки пластинок Al и Cu существенно влияет на количественное соотношение продуктов поступающих в лазерный факел. Наблюдается явная зависимость поступления ионов Al и субоксидов AlO от порядка установки пластинок. Во втором случае их существенно меньше.

Наблюдаемая зависимость интенсивности атомных Al и Cu, ионных линий Al и полос AlO от порядка установки пластинок и номера импульса может быть объяснена следующим образом. При импульсно-периодическом высокоинтенсивном лазерном воздействии в одну точку мишени образуется микроканал. После пробивки пластинки из сплава алюминия и начала абляции меди в факел начинают поступать атомы и ионы меди совместно с атомами алюминия, испаряемые с боковой поверхности микроканала при абляции пластинки из сплава меди. Температура плазмы в этом случае несколько ниже и соответственно ухудшаются условия образования как ионов алюминия, так и субоксидов алюминия.

УДК 535(06)+004(06)

М.Н. КОВАЛЕНКО, Н.А. АЛЕКСЕЕНКО[1], Е.С. ВОРОПАЙ, А.П. ЗАЖОГИН

Белорусский государственный университет, Минск
[1]Институт порошковой металлургии, Минск, Беларусь

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОПОРОШКОВ ОКСИДОВ МЕДИ С СЕРЕБРОМ ПРИ ЛАЗЕРНОМ РАСПЫЛЕНИИ ГИБРИДНОЙ МИШЕНИ В АТМОСФЕРЕ ВОЗДУХА

Изучены процессы получения смешанных нанопорошков из оксидов меди и серебра методом абляции сдвоенными лазерными импульсами гибридной мишени, состоящей из медной пластинки покрытой слоем серебра, в атмосфере воздуха. Показано, что подбирая величину и тип расфокусировки лазерного пучка можно варьировать состав нанопорошков.

M.N. KOVALENKO, N.A. ALEKSEENKO[1], E.S. VOROPAY, A.P. ZAJOGIN

Belarussian State University, Minsk
[1]SSI «Powder Metallurgy Institute», Minsk, Belarus

RESEARCH OF THE PROCESSES OF OBTAINING NANOPOWDERS OF COPPER OXIDES WITH SILVER BY LASER SPRAYING OF A HYBRID TARGET IN THE AIR ATMOSPHERE

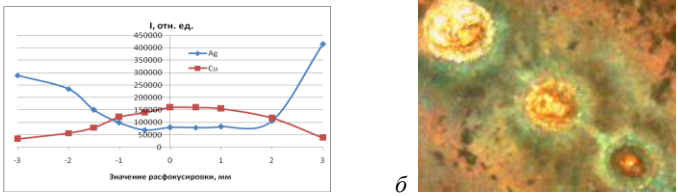
The processes of obtaining mixed nanopowders from copper and silver oxides by ablation with dual laser pulses of a hybrid target consisting of a copper plate coated with a layer of silver in an air atmosphere have been studied. It has been shown that by selecting the magnitude and type of defocusing of the laser beam, the composition of nanopowders can be varied.

Одна из наиболее важных отраслей, где применяются смешанные оксиды, — это каталитическая химия. Разные металлы различным образом создают соединения, содержащие кислород (оксиды). Если в одном соединении кислород связан сразу с двумя металлами, его свойства резко отличаются, от тех, что можно наблюдать в обычных оксидах металлов. Такой кислород может значительно активнее реагировать с внешними соединениями, то есть быть куда более эффективным катализатором, в том числе и при низких температурах. Нанопорошки,

включающие в себя оксиды меди и серебра, также интересны для применения в медицине для подавления роста бактерий и микробов.

Цель работы состояла в том, чтобы показать возможность и определить условия для получения методом последовательного воздействия сериями расфокусированных сдвоенных лазерных импульсов на гибридную мишень, состоящую из пластинки меди покрытой тонким слоем серебра (10 мкм), в воздушной атмосфере нанопорошков состоящих из оксидов меди, легированных серебром. Для проведения исследований использовали лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1.

Результаты исследований по зависимости интенсивности линий Ag (520,907 нм) и Cu (510,552 нм) от величины расфокусировки при последовательном воздействии 30 сдвоенных лазерных импульсов на гибридную мишень в атмосфере воздуха приведены на рис. 1*а*. Энергии импульсов 50 мДж, интервал между импульсами 10 мкс.



а *б*

Рис. 1. Зависимость интенсивности линий (*а*), изображение поверхности мишени после последовательного напыления оксидов цинка и меди на стекле (*б*)

Из сравнения графиков видно, что наиболее существенные изменения в интенсивностях линий наблюдаются при расфокусировке более чем на ± 1,5 мм. Изображения поверхности мишени, с точками воздействия сдвоенных импульсов (порядок +3, +2, +1 мм – сверху вниз) полученные с помощью микроскопа Webbers, увеличение 50 раз, приведены на рис. 1*б*.

Видно, что при большой расфокусировке (+3. +2 мм) поверхность точек, преимущественно покрыта серебром. При расфокусировке 1 мм и менее вокруг точек абляции поверхность покрывается слоем оксида меди, чёрного цвета. Аналогичное наблюдается и при отрицательной расфокусировке. Изменяя количество лазерных импульсов в серии и величину расфокусировки, возможно целенаправленно менять состав прекурсоров для изготовления тех или иных нанопорошков для соответствующих применений.

УДК 535(06)+004(06)

И.Е. ПЕРМЯКОВА, А.А. ИВАНОВ[1], О.П. ЧЕРНОГОРОВА[2]
Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина, Москва
[1]Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
[2]Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва

КОРОТКОИМПУЛЬСНАЯ ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА АМОРФНЫХ СПЛАВОВ

Изучено влияние импульсного облучения эксимерным УФ-лазером на структурные превращения в аморфных сплавах на основе кобальта и железа, на процессы фазообразования в них, формирование уникального комплекса физико-механических свойств, показана возможность создания аморфно-нанокристаллических композитов.

I.E. PERMYAKOVA, A.A. IVANOV[1], O.P. CHERNOGOROVA[2]
Bardin Central Research Institute of Ferrous Metallurgy, Moscow
[1]National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)
[2]Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the RAS, Moscow

SHORT-PULSE LASER TREATMENT OF AMORPHOUS ALLOYS

The influence of excimer UV pulse laser irradiation on structural transformations of Fe and Co based amorphous alloys on phase formation and the formation of a unique complex of properties was studied. The possibility of creating amorphous-nanocrystalline composites has been demonstrated.

Разработаны физические основы создания аморфно-нанокристаллических композитов (АНК) с улучшенными свойствами путём частичной нанокристаллизация аморфного состояния при импульсном лазерном облучении пространственно-распределённых зон по поверхности и объёму аморфных сплавов (АС) и выбранных параметрах эксимерного УФ KrF-лазера.

Даны рекомендации по режиму обработки в пределах аморфного состояния малыми дозами лазерного излучения (до 100 импульсов) для снятия внутренних закалочных напряжений и снижения магнитных потерь АС: при фиксированных параметрах УФ-лазера (λ = 248 нм, τ = 20 нс, f = 2 Гц, R_s = 4.2 мм) энергию импульсов E можно варьировать, но она не должна превышать 155 мДж для АС $Co_{70.5}Fe_{0.5}Cr_4Si_7B_{18}$, 120 мДж для

$Fe_{50}Ni_{33}B_{17}$ и 40 мДж для $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$. Увеличение E спровоцирует кристаллизацию, что может быть использовано на практике для изменения конфигураций чередующихся зон аморфной и кристаллической составляющей по поверхности и сечению лент АС. Показано, что лазерным нагревом можно достигать односторонней их кристаллизации, формировать двухслойные и "сэндвичевые" структуры типа "кристаллическое-аморфное-кристаллическое", регулировать толщину кристаллического слоя и частично его фазовый состав, создавать композиты, представляющие собой аморфную матрицу, армированную кристаллическими областями в заданных технологических позициях (плотно покрытые, полосовые, шахматные).

Установлена связь между структурно-фазовыми превращениями при лазерной обработке АС и откликом их механических свойств. Предсказанное теоретически лазерное упрочнение АС на основе компьютерного моделирования реализовано на практике, в частности при облучении УФ-лазером АС $Co_{70.5}Fe_{0.5}Cr_4Si_7B_{18}$ зафиксировано двухстадийное увеличение микротвёрдости на ~ 20 %.

Короткоимпульсная лазерная обработка магнитомягких АС системы Fe-Ni-B может быть использована как альтернативный метод оксидирования, способствующий формированию на поверхности прочной оксидной плёнки с высоким омическим сопротивлением. Данная технология создания резистивных слоёв позволит уменьшить потери мощности в сердечниках трансформаторов, где находят применение АС. Лазерная модификация АС $Fe_{53.3}Ni_{26.5}B_{20.2}$ при малых дозах (до 200 импульсов) способствует улучшению качества поверхности, частично устраняя шероховатости, поры и снимая остаточные напряжения. Обработка эксимерным УФ-лазером при $f = 2$ Гц, $E = 150$ мДж, $W = 0.6$ Дж/см^2 в диапазоне $0 < n \leq 500$ имп. перспективна для повышения прочностных качеств, упругости и сохранения ненулевой пластичности АС $Fe_{53.3}Ni_{26.5}B_{20.2}$. При $n = 200$ имп. прирост его твёрдости и модуля упругости составляет 8-10 %, а при $n = 500$ имп. – 23 - 25 %.

Установлено, что чередование в шахматном порядке кристаллических и аморфных зон в соотношении 1:5 по объёмной доле, является оптимальным для сочетания высокой прочности и удовлетворительной пластичности АНК на базе АС $Co_{28.2}Fe_{38.9}Cr_{15.4}Si_{0.3}B_{17.2}$. Показано, что режим облучения этого сплава в диапазоне частот $2 \text{ Гц} \leq f \leq 20$ Гц (при $n = 100$ имп., $E = 150$ мДж, $W = 0.6$ Дж/см^2) улучшает и поддерживает высокие значения микротвёрдости 9.12 - 9.45 ГПа при сохранении аморфности в структуре.

УДК 535(06)+004(06)

Н.М. АШАРЧУК, Е.И. МАРЕЕВ
Институт фотонных технологий ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Троицк

ДИНАМИКА МЕХАНИЧЕСКИХ ПОСТ-ЭФФЕКТОВ, ИНДУЦИРОВАННЫХ ФЕМТОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ В СВЕРХКРИТИЧЕСКОМ ДИОКСИДЕ УГЛЕРОДА

Приведено исследование динамики воздействия ультракоротких лазерных импульсов на сверхкритический диоксид углерода. После лазерного воздействия генерируются ударные волны и кавитационный пузырь. В отличие от процесса кавитации в воде, в сверхкритическом диоксиде углерода не происходит коллапса кавитационного пузыря, вместо этого он распадается на отдельные кластеры.

N.M. ASHARCHUK, E.I. MAREEV
Institute of Photonic Technologies FSRC «Crystallography and Photonics» of the RAS, Troitsk

DYNAMICS OF MECHANICAL POST-EFFECTS INDUCED BY FEMTOSECOND LASER PULSES IN SUPERCRITICAL CARBON DIOXIDE

The study investigates the dynamics of ultra-short laser pulse interactions with supercritical carbon dioxide. Following the laser impact, shock waves and a cavitation bubble are generated. Unlike the cavitation process in water, the cavitation bubble does not collapse in supercritical carbon dioxide; instead, it disintegrates into separate clusters.

Сверхкритические флюиды находят широкое применение в различных областях науки и техники и могут быть использованы для очистки, экстракции и микроионизации. Одним из наиболее используемых флюидов является диоксид углерода, который является не токсичным, дешевым и может быть использован при таких задачах как нанесение плёнок при высоком давлении, синтезе наночастиц с помощью лазерной абляции.

Острая фокусировка интенсивного ультракороткого лазерного импульса в объём среды приводит к генерации плазмы. За счёт высоких давлений (вплоть до ТПа) и температур (вплоть до 10^5 К) достигаемых в лазерно-индуцированной плазме при передачи энергии от электронной к

атомной подсистеме возникает ряд обратимых и необратимых пост-эффектов, включающих генерацию ударных волн, формирование кавитационных пузырей, а также фазовые переходы (жидкость=>пар=>сверхкритический флюид) [1, 2]. Для исследования лазерно-индуцированных ударных волн и кавитационных пузырей на фемтосекундном – микросекундном масштабе используется метод время-разрешённой теневой фотографии. В данном методе используется два импульса: возбуждающий импульс (1030 нм, 200 фс, энергия до 1 мДж) и импульс зондирования (527 нм, 4 нс, энергия до 250 мкДж). Возбуждающий импульс остро фокусируется (NA = 0.45) в реактор высокого давления, содержащий CO_2, генерируя плазму, ударные волны, а также кавитационные пузыри. Рассеянный на диффузионной пластине зондирующий импульс собирается камерой с помощью микроскопического объектива. Задержка между импульсами варьируется программным образом с шагом 125 пс с помощью программно-аппаратного комплекса на основе ПЛИС. Теневые фотографии, полученные с ПЗС-камеры, представлены на рис. 1.

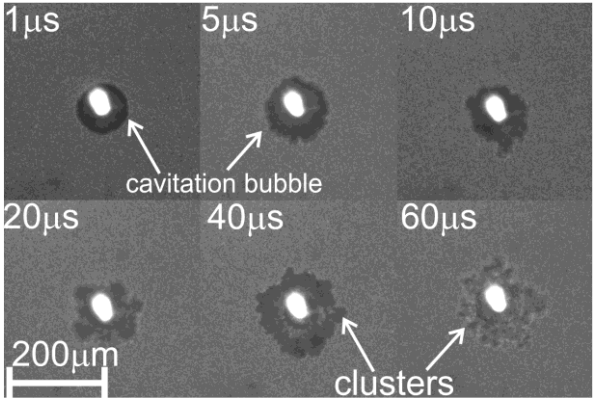


Рис. 1. Динамика лазерно-индуцированных кавитационных пузырей в сверхкритическом диоксиде углерода

Проект поддержан грантом РНФ № 23-79-10188.

Список литературы

1. Asharchuk N.M., Mareev EI.. Dynamics of laser-induced shock waves in supercritical CO_2 // Fluids. 2022. V. 7. No. 11. P. 350.

2. Mareev E.I., et al. Time-resolved optical probing of the non-equilibrium supercritical state in molecular media under ns laser-plasma impact // Opt. Exp. 2021. V. 29. No. 21. P. 33592-33601.

УДК 535(06)+004(06)

А.Н. ЕГОРОВ, О.Б. МАВРИЦКИЙ, А.А. ПЕЧЕНКИН,
М.С. ХОЛИНА
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПРИБОРАХ НА ОСНОВЕ ШИРОКОЗОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ ПРИ ФЕМТОСЕКУНДНОМ МНОГОФОТОННОМ ЛАЗЕРНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ

Представлены результаты экспериментального исследования переходных процессов генерации носителей заряда в полупроводниковых приборах на основе широкозонных полупроводников за счёт многофотонного поглощения импульсного лазерного излучения фемтосекундной длительности. Приведено сравнение характеристик электрической реакции на лазерное воздействие для двух- и трёхфотонного процессов возбуждения.

A.N. EGOROV, O.B. MAVRITSKII, A. A. PECHENKIN,
M.S. KHOLINA
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

TRANSIENT PROCESSES IN WIDE-BANDGAP SEMICONDUCTOR DEVICES UNDER FEMTOSECOND MULTI-PHOTON LASER EXCITATION

The experimental study of transient charge generation processes in wide-bandgap semiconductor devices due to multiphoton absorption of femtosecond pulsed laser radiation is carried out. A comparison of the electrical response to the laser exposure for two- and three-photon excitation processes is presented.

Широкозонные полупроводники (далее – ШЗП), такие как карбид кремния (SiC) и нитрид галлия (GaN), являются перспективными материалами для силовых устройств следующего поколения благодаря их высоким значениям критического электрического поля, теплопроводности и порога насыщения скорости дрейфа электронов. Известно [1, 2], что силовые полупроводниковые приборы, например, диоды или полевые транзисторы, подвержены такому катастрофическому радиационному эффекту, как вторичный пробой (SEB) под действием протонов, тяжелых ионов и нейтронов, что является серьёзной угрозой для надежности систем питания в реальных радиационных условиях космического пространства. Подобные эффекты в наземных условиях могут быть

инициированы с помощью сфокусированного импульсного лазерного излучения ультракороткой длительности. Однако, для приборов на основе ШЗП данный метод должен быть модифицирован, поскольку энергии кванта излучения распространённых фемтосекундных лазеров недостаточно для возбуждения носителей заряда в однофотонном режиме.

В данной работе мы исследовали электрический отклик, индуцированный в выбранных тестовых ШЗП-структурах при воздействии фемтосекундного импульсного лазерного излучения ультракороткой длительности с длинами волн, соответствующих случаю двух- и трёхфотонного процессов возбуждения. Изучалась зависимость отклика от режимов работы, энергии лазерного импульса и местоположения фокуса лазерного пучка относительно чувствительной области, полученные результаты для разных процессов возбуждения сравнивались между собой. Примеры полученных зависимостей, измеренных для диодной структуры на основе SiC для случаев двух- (2ФП) и трёхфотонного (3ФП) поглощения представлены на рис. 1.

Таким образом, в данной работе продемонстрирована возможность генерировать в структурах на основе широкозонных полупроводников неравновесный заряд за счёт многофотонных процессов возбуждения при облучении этих структур лазерным излучением фемтосекундной длительности.

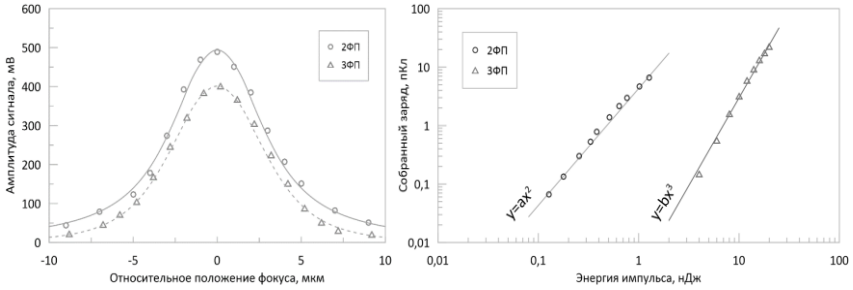


Рис. 1. Зависимость характеристик электрического отклика от смещения фокуса лазерного пучка (слева) и энергии лазерного импульса (справа)

Список литературы

1. Fouillat P., Pouget V., McMorrow D., et al. Radiation Effects on Embedded Systems. Springer, 2007.

2. Mbaye N., Pouget V., Darracq F., Lewis D. Characterization and modeling of laser-induced single-event burn-out in SiC power diodes // Microelectron. Rel. 2013. V. 53. P. 1315-1319.

УДК 535(06)+004(06)

М.В. РЕШЕТОВА[1,2], Н.В. МИНАЕВ[2]
[1]Сколковский институт науки и технологий
[2]Институт фотонных технологий ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Троицк

РАЗРАБОТКА МЕТОДА НАСТРОЙКИ СИСТЕМЫ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ФОКУСИРОВКИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ФОРМЫ ВОКСЕЛЯ В ТЕХНОЛОГИИ ДВУХФОТОННОЙ 3Д ПЕЧАТИ

Проведена модернизация установки для формирования трёхмерных структур методом двухфотонной фемтосекундной полимеризации с использованием схемы пространственно-временной фокусировки. Для настройки установки выполнены оценочные расчёты вносимой дисперсии второго и третьего порядка в системе компрессора и стретчера. Поиск оптимального положения ретрорефлектора в схеме компрессора означает минимизацию суммарной дисперсии, получаемой лазерным импульсом при прохождении системы фокусировки. Для определения положения ретрорефлектора, соответствующего минимальной суммарной дисперсии, необходимо напечатать серию тестовых образцов для различных его положений в области оцененной расчётом теоретической координаты.

M.V. RESHETOVA[1,2], N.V. MINAEV
[1]Skolkovo Institute of Science and Technology
[2]Institute of Photonic Technologies FSRC «Crystallography and Photonics» of the RAS, Troitsk

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR CONFIGURING A SPATIAL-TEMPORAL FOCUSING SYSTEM TO OPTIMIZE VOXEL SHAPE IN TWO-PHOTON 3D PRINTING TECHNOLOGY

The installation was modernized for the formation of three-dimensional structures by two-photon femtosecond polymerization using a spatiotemporal focusing scheme. To set up the installation, estimated calculations of the introduced dispersion of the second and third order in the compressor and stretcher system were performed. Finding the optimal position of the retroreflector in the compressor circuit means minimizing the total dispersion obtained by the laser pulse when passing through the focusing system. To determine the position of the retroreflector corresponding to the minimum total dispersion, it is necessary to print a series of test samples for its various positions in the region of the theoretical coordinate estimated by calculation.

Технология двухфотонной полимеризации в настоящее время широко используется для создания структур с микронным и субмикронным разрешением. Технология создания трёхмерных структур методом двухфотонной фемтосекундной полимеризации является одним из видов трёхмерной печати и применяется для создания микрообъектов [1] различного назначения. Технология основана на индуцированном лазерным излучением двухфотонном отверждении фотоотверждаемой полимерной композиции. Отверждение происходит благодаря реакции радикальной полимеризации, индуцируемой при двухфотонном поглощении фемтосекундного лазерного излучения. При этом область полимеризации (воксель) может быть субмикронного размера [2]. Например, при использовании объективов с высокой числовой апертурой область полимеризации может иметь характерные размеры ~ 200 нм.

При использовании классического метода фокусировки добиться вокселя большого размера сферически симметричной формы достаточно затруднительно. При повышении мощности излучения эллиптичность вокселя растёт в направлении распространения луча быстрее, чем поперёк. Также она зависит от типа используемого объектива. Поэтому для оптимизации формы вокселя используется методика пространственно-временной фокусировки.

В представляемой работе техника SSTF реализована с использованием излучения второй гармоники фемтосекундного лазера ТЕМА-100 (Авеста, Россия) (λ = 525 нм, длительность импульса ~ 200 фс, частота повторения 70 МГц, $P_{ср} \leq 1{,}2$ Вт). В установке лазерный луч проходит через две оптические системы: временного растяжения (стретчер типа Мартинез) и сжатия (компрессор типа Трейси). Варьирование положения ретрорефлектора позволяет проводить юстировку системы SSTF и оптимизировать дисперсию фокусирующей оптики. Целью работы является экспериментальная верификация математической модели работы системы пространственно-временной фокусировки.

Список литературы

1. Maruo S., Nakamura O., Kawata S. Three-dimensional microfabrication with two-photon-absorbed photopolymerization // Optics Letters. 1997. V. 22. No. 2. P. 132-134.

2. Lee K., et al. Two-photon stereolithography // Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials. 2007. V. 16. No. 1. P. 59-73.

3. Nguyen A.K., Narayan R.J. Two-photon polymerization for biological applications // Materials Today. 2017. V. 20. No. 6. P. 314-322.

4. Epifanov E.O., et al. Fabrication of micro-optical connectors for electro-optical sensor devices by a combined femtosecond laser system // Laser Physics Letters. 2021. V. 18. No. 3. P. 36201-36208.

УДК 535(06)+004(06)

Д.А. ХАЧАТРЯН[1], А.В. ШЕЛЯКОВ[1], Н.Н. СИТНИКОВ[1,2],
К.А. БОРОДАКО[1]
[1]Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
[2]Исследовательский центр им. М.В. Келдыша, Москва

МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ИНСТРУМЕНТ НА ОСНОВЕ ОБРАТИМОГО ЭФФЕКТА ПАМЯТИ ФОРМЫ

В работе продемонстрирована возможность манипулирования оптическими микрообъектами с помощью микропинцета на основе аморфно-кристаллического сплава TiNiCu с обратимой памятью формы. Исследовано влияние структурных и термомеханических свойств аморфно-кристаллического композита на функциональные параметры микроустройства.

D.A. KHACHATRIAN[1], A.V. SHELYAKOV[1], N.N. SITNIKOV[1,2],
K.A. BORODAKO[1]
[1]National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)
[2]Keldysh Research Center, Moscow

MICROMECHANICAL TOOL BASED ON THE TWO-WAY SHAPE MEMORY EFFECT

The work demonstrates the possibility of manipulating optical microobjects using microtweezers based on an amorphous-crystalline TiNiCu alloy with two-way shape memory. The influence of the structural and thermomechanical properties of the amorphous-crystalline composite on the functional parameters of the microdevice was studied.

В последнее время показана эффективность использования сплавов, обладающих эффектом памяти формы (ЭПФ), для создания микроустройств в различных областях техники, в частности, в приборостроении, робототехнике, космических технологиях, биомедицине. Для миниатюризации микромеханических устройств становится актуальным получение материалов с ЭПФ в виде тонкой ленты, фольги или плёнки. В последнее время особый интерес вызывает получение структурно-композитных материалов с обратимым ЭПФ. Недавно нами показано, что аморфно-кристаллический композит из сплава $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$ (ат. %), полученный методом быстрой закалки из расплава в виде тонких лент толщиной около 40 микрон, обладает ярко выраженным обратимым ЭПФ. Образцы этого сплава, изготовленные с

разной скоростью охлаждения расплава, использовались в качестве основного материала для изготовления микропинцета (микрозахвата). Настоящая работа посвящена исследованию влияния структурных и термомеханических свойств такой аморфно-кристаллической ленты на функциональные параметры микроустройства.

СЭМ-исследования поперечного сечения образцов показали, что при снижении скорости охлаждения расплава от $8 \cdot 10^5$ до $4 \cdot 10^5$ К/с толщина кристаллического слоя увеличивается от 6 до 13 мкм. Результаты рентгеноструктурных исследований кристаллического слоя выявили во всех образцах присутствие на дифрактограммах рефлексов орторомбической структуры B19, характерной для сплава TiNiCu в мартенситном состоянии. При нагреве до температуры 80 °С рефлексы мартенситной фазы B19 полностью исчезают, и фиксируются только пики аустенитной фазы B2, то есть происходит мартенситное превращение (МП) B19 → B2. Исследование МП с помощью дифференциальной сканирующей калориметрии показало, что увеличение толщины кристаллического слоя от 6 до 13 мкм не только существенно (почти в 1,5 раза) увеличивает энтальпию МП, но и приводит к значительному (до 10 градусов) росту критических температур МП. Для измерения усилия, развиваемого образцами при реализации обратимого ЭПФ, была разработана специальная методика и изготовлена лабораторная установка. Установлена температурная зависимость создаваемых механических напряжений от длины образца и толщины кристаллического слоя.

Способность аморфно-кристаллического композита к обратимой изгибной деформации была использована для создания микромеханического инструмента (микропинцета). С этой целью два отрезка ленты с помощью микросварки соединялись с возможностью изгибаться навстречу друг другу при нагреве, образуя зажимные части (губки) микропинцета. Длина губок и величина зазора микропинцета могут регулироваться в диапазоне от 1 до 3 мм и от 10 до 100 мкм, соответственно, в зависимости от размера и типа захватываемых микрообъектов. Продемонстрирован полный процесс манипулирования (захват – удержание – перемещение – освобождение) оптических волокон диаметром от 10 до 20 мкм с использованием изготовленного устройства.

Работа выполнена за счёт гранта РНФ (проект № 23-29-00779).

УДК 535(06)+004(06)

А.Ф. КОВАЛЕНКО
Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, Москва

ОБОСНОВАНИЕ НЕРАЗРУШАЮЩИХ РЕЖИМОВ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ОТЖИГА НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИН

В рамках квазистатической и динамической задач термоупругости получены аналитические соотношения, являющиеся критериями термопрочности неметаллических пластин при импульсном лазерном отжиге. Проведена экспериментальная проверка адекватности расчётных соотношений.

A.F. KOVALENKO
N.L. Dukhov All-Russian Scientific Research Institute of Automatics, Moscow

SUBSTANTIATION OF NON-DESTRUCTIVE MODES OF PULSED LASER ANNEALING OF NON-METALLIC PLATES

Within the framework of quasi-static and dynamic problems of thermoelasticity, analytical relations are obtained that are criteria for the thermal strength of non-metallic plates during pulsed laser annealing. An experimental verification of the adequacy of the calculated ratios was carried out.

Для отжига диэлектрических и полупроводниковых пластин после ионной имплантации используют импульсные лазеры, работающие в режимах свободной генерации или модулированной добротности [1]. Для воздействия в режиме свободной генерации можно рассматривать квазистатическую задачу термоупругости [1, 2]. Для воздействий в режиме модулированной добротности необходимо рассматривать динамическую задачу термоупругости [3]. Будем считать пластину термостойкой, если она не будет разрушена термоупругими напряжениями в процессе нагрева её поверхности лазерным излучением от начальной температуры до температуры отжига.

Сущность метода обоснования неразрушающих режимов лазерного отжига пластин состоит в следующем:

для каждого режима воздействия рассчитывают температурное поле в пластине на момент окончания лазерного импульса;

в рамках соответствующей задачи термоупругости определяют плотность энергии W_T лазерного излучения, приводящего к разрушению пластины термоупругими напряжениями;

рассчитывают плотность энергии лазерного излучения W_f, необходимую для нагрева поверхности пластины до температуры отжига;

ставят условие $W_T / W_f \geq 1$;

из этого условия путём разделения констант, характеризующих свойства материала пластины, и функции, характеризующей лазерное воздействие, находят условие термопрочности пластины.

Например, при воздействии в режиме свободной генерации условие термопрочности пластины при её полном накрытии излучением имеет вид:

$$\frac{\sigma_{BP}(1-\nu)}{E\alpha_T(T_f - T_0)} \geq \frac{1-e^{-\chi h} - \chi h e^{-\chi h}}{\chi h}, \qquad (1)$$

где σ_{BP} – предел прочности материала пластины на растяжение, E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона, T_f – температура отжига, T_0 – начальная температура, χ – показатель поглощения материала пластины на длине волны лазерного излучения, h – толщина пластины.

Если пластина частично накрывается излучением при тех же условиях, условие термопрочности имеет вид:

$$\frac{\sigma_{BP}(1-\nu)}{E\alpha_T(T_f - T_0)} \geq \frac{1}{2}\{\frac{1-e^{-\chi h}}{\chi h} + \frac{6}{(\chi h)^2}[\frac{\chi h}{2} - 1 + e^{-\chi h}(1 + \frac{\chi h}{2})]\}(\rho_{\Pi}^2 + 1); \qquad (2)$$

где: ρ_n – отношение радиуса пятна лазерного излучения на поверхности пластины к её радиусу. В рамках динамической задачи установлено, что условие термопрочности пластины зависит от временной формы лазерного импульса. Например, для временной формы лазерного импульса в виде полуволны синусоиды оно имеет вид:

$$2\sigma_{BP} / [3K\alpha_T(T_f - T_0)] \geq \pi^2(1 + e^{-\chi C_0 \tau}) / 2[(\chi C_0 \tau)^2 + \pi^2)], \qquad (3)$$

где: K – модуль всестороннего сжатия материала пластины, C_0 – скорость звука в материале, τ – длительность лазерного импульса. Проведена экспериментальная проверка адекватности полученных соотношений.

Список литературы

1. Коваленко А.Ф. Способы импульсного лазерного отжига неметаллических пластин // Стекло и керамика. 2016. № 6. С. 31-35.

2. Коваленко А.Ф. Лазерный импульсный отжиг стеклянных пластин при частичном их накрытии излучением // Стекло и керамика. 2018. № 2. С. 27-31.

3. Коваленко А.Ф. Отжиг стеклообразных и керамических материалов наносекундными лазерными импульсами // Стекло и керамика. 2018. № 6. С. 37-42.

УДК 535(06)+004(06)

М.Д. МОЖАЕВА[1,2], А.А. КОРШУНОВ[1,2], А.А. ГАРМАТИНА[2], Н.М. АШАРЧУК[2], В.В. РОВЕНКО[2], Е.И. МАРЕЕВ[2], Н.В. МИНАЕВ[2]

[1]Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
[2]Институт фотонных технологий ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Троицк

ПОИСК ПУТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ВЫХОДА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИЗ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ, СОЗДАВАЕМОЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ОСТРОСФОКУСИРОВАННОГО ПУЧКА ФЕМТОСЕКУНДНОГО ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА НА МЕДНУЮ МИШЕНЬ

Исследованы зависимости выхода рентгеновских фотонов от параметров лазерного излучения при различных условиях: в атмосфере, с поддувом инертного газа, а также в условиях пониженного давления (низкого вакуума). Разработана экспериментальная система лазерного воздействия на металлическую мишень в условиях низкого вакуума с возможностью вывода рентгеновского излучения.

M.D. MOZHAEVA[1,2], A.A. KORSHUNOV[1,2], A.A. GARMATINA[2], N.M. ASHARCHUK[2], V.V. ROVENKO[2], E.I. MAREEV[2], N.V. MINAEV[2]

[1]National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)
[2]Institute of Photonic Technologies FSRC «Crystallography and Photonics» of the RAS, Troitsk

SEARCH FOR WAYS TO INCREASE THE OUTPUT OF X-RAY RADIATION FRON LASER PLASMA GANERATED WHEN EXPOSED SHARP- FOCUSED RADIATION OF A FIBER LASER ON A COPPER TARGET

The dependences of the output of X-ray photons on the parameters of laser radiation under various conditions are investigated: in the atmosphere, with the blowing of an inert gas, as well as under conditions of low pressure (low vacuum). An experimental system of laser exposure to a metal target in low vacuum conditions with the possibility of X-ray emission has been developed.

Зависимость выхода рентгеновского излучения (РИ), при воздействии фемтосекундного волоконного лазера на поверхность медной мишени цилиндрической формы, вращающейся с высокой скоростью [1], от энергии лазерного импульса имеет кубический вид [2], однако при увеличении лазерной энергии выше предельной происходит насыщение. Предположительно, это связано с потерями энергии излучения на ионизацию воздуха. В рамках работы проведено исследование выхода рентгеновского излучения в различных средах: с поддувом инертного газа (гелия), так как у таких газов порог ионизации выше, чем у воздуха, а также в условиях пониженного давления, так как при уменьшении концентрации воздуха пропорционально ему уменьшится и количество ионизованных атомов, следовательно и потери энергии излучения.

Целью работы является исследование зависимости выхода РИ от параметров лазерного излучения в различных средах и разработка и апробация системы, в которой можно проводить данные измерения.

Установлено, при измерениях в условиях поддува гелия максимальный выход РИ и предельная энергия импульса выше, чем в воздухе при одинаковых параметрах излучения. Для измерений в условиях низкого вакуума был спроектирован бокс из толстостенного оргстекла с предусмотренным вводом лазерного излучения и выводом РИ. Рассчитаны оптимальные размеры камеры, в которую помещаются мишень и микрообъектив. Использовался фемтосекундный лазер ТЕТА-20 с параметрами: $\lambda = 1030$ нм, средняя мощность до 20 Вт, максимальная энергия импульса 1 мДж (20 кГц), максимальная частота 200 кГц, минимальная длительность импульсов 200 фс. С помощью поддува инертного газа ослаблено влияние ионизации воздуха на выход РИ. Спроектирована и изготовлена система для генерации рентгеновского излучения в условиях низкого вакуума, позволившая оценить влияние окружающей среды на процесс генерации рентгеновского излучения. Полученные данные востребованы при создании микрофокусных источников рентгеновского излучения с лазерно-плазменной накачкой [3].

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки в рамках государственного задания ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН и Минобрнауки РФ (грант № 075-15-2021-1362) в части проектирования микрофокусного источника рентгеновского излучения.

Список литературы

1. Martín L., Benlliure J., et al., // Physica Medica. 2021. V. 82. P. 164-166.

2. Ivanov K.A., Gavrilin I.M, et al., // Laser Physics Letters. 2021. V. 18 (7). P. 075401.

3. Garmatina A.A., Mareev E.I., Minaev N.V., et al. Vacuum-free femtosecond fiber laser microplasma X-ray source for radiography // Optics Express. 2023. V. 31 (26). P. 44259-44262.

УДК 535(06)+004(06)

А.А. КОРШУНОВ[1,2], М.Д. МОЖАЕВА[1,2], Н.М. АШАРЧУК[2],
В.В. РОВЕНКО[2], Е.И. МАРЕЕВ[2], Н.В. МИНАЕВ[2]
[1]Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
[2]Институт фотонных технологий ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Троицк

ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗРАБОТКИ ИСТОЧНИКА ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА

Приведены аспекты разработки источника характеристического рентгеновского излучения на основе фемтосекундного волоконного лазера в части разработки системы управления экспериментальной установкой, а также разработки системы автоматической юстировки оптической системы на основе машинного обучения с подкреплением.

A.A. KORSHUNOV[1,2], M.D. MOZHAEVA[1,2], N.M. ASHARCHUK[2],
V.V. ROVENKO[2], E.I. MAREEV[2], N.V. MINAEV[2]
[1]National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)
[2]Institute of Photonic Technologies FSRC «Crystallography and Photonics» of the RAS, Troitsk

TECHNICAL ASPECTS OF THE DEVELOPMENT OF SOURCE OF CHARACTERISTIC X-RAY RADIATION BASED ON FEMTOSECOND FIBRE LASER

Presented the aspects of development of source of characteristic X-ray radiation based on femtosecond fibre laser from the point of the development of an experimental installation control system and also the development of the system of automatic adjustment of the optic system based on machine learning.

На текущий момент, одним из перспективных источников рентгеновского излучения для использования в целях рентгенографии биологических объектов, имеющих низкий коэффициент поглощения, являются источники на основе фемтосекундных лазеров, в которых рентгеновское излучение рождается в процессе взаимодействия лазерного излучения и поверхности металлической мишени. Такие источники имеют малый размер, относительно их синхротронных аналогов или рентгеновских микрофокусных трубок, при этом, сохраняя достаточно высокий выход рентгеновских фотонов.

Однако лазерные установки имеют ряд сложностей с эксплуатацией, связанных с необходимостью точного выставления положения мишени, на поверхности которой происходит генерация рентгеновского излучения, её наклона, а также ряда других элементов оптической схемы. Подобные задачи решаются использованием большого количества моторизированных позиционеров, способных перемещать объекты с микронной точностью. На текущий момент установка [1] насчитывает около двадцати подвижек, которые осуществляют выставление основных элементов оптической цепи по их осям. Управление ими осуществляется с помощью трёх микроконтроллеров для ЧПУ оборудования «Duet 2 Wifi».

Однако, даже при корректном и точном выставлении положения всех элементов оптической схемы, возникают проблемы, связанные с постепенной дефокусировкой лазерного излучения, что ведёт к увеличению размера рентгеновского источника и падению выхода рентгеновских фотонов. В качестве двух основных причин данного явления можно выделить линейный тред, связанный с абляцией материала мишени при лазерном воздействии, а также постепенная разъюстировка оптической схемы при долговременной эксплуатации установки. Соответственно, возникает необходимость в периодической рефокусировке лазерного излучения. Однако ручное выставление оптимальных положений элементов оптической схемы было бы неэффективным, при учёте долговременных экспериментов.

В связи с этим в настоящий момент разрабатывается оптическая система, которая, с использованием технологий машинного обучения с подкреплением, могла бы выполнять самостоятельную юстировку. Данная система, автоматически анализируя в режиме реального времени сигнал, получаемый с регистрации на спектрометре второй гармоники, которая возникает в результате лазерно-плазменных взаимодействий, осуществляет подстройку оптической схемы, управляя моторизированными позиционерами, что устраняет описанные выше дефекты. Разработанная система значительно повышает автономность и устойчивость установки.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки в рамках государственного задания ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН и Минобрнауки РФ (грант № 075-15-2021-1362) в части проектирования микрофокусного источника рентгеновского излучения.

Список литературы

1. Garmatina A.A., Mareev E.I., Minaev N.V., et al. Vacuum-free femtosecond fiber laser microplasma X-ray source for radiography // Optics Express. 2023. V. 31 (26). P. 44259-44262.

УДК 535(06)+004(06)

Е.С. ВОРОПАЙ, М.Н. КОВАЛЕНКО, Н.А. АЛЕКСЕЕНКО[1], А.П. ЗАЖОГИН

Белорусский государственный университет, Минск
[1]Институт порошковой металлургии, Минск, Беларусь

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРИ НАПЫЛЕНИИ НАНОПЛЁНОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ ИЗ ОКСИДОВ ЦИНКА, ЛЕГИРОВАННЫХ МЕДЬЮ, ПРИ ЛАЗЕРНОМ РАСПЫЛЕНИИ ЦИНКА И МЕДИ В АТМОСФЕРЕ ВОЗДУХА

Изучены процессы при напылении газочувствительных наноплёночных резисторов из оксидов меди, легированных оксидами цинка, методом абляции сдвоенными лазерными импульсами гибридной мишени состоящей из склеенных между собой пластинок из цинка Ц0 и меди М2 в атмосфере воздуха. Резистор напылён на дорожку шириной 300 мкм изготовленной в медной фольге на фольгированном стеклотекстолите. Оценены параметры чувствительности сенсора на аммиак, воду, уксусную кислоту.

E.S. VOROPAY, M.N. KOVALENKO, N.A. ALEKSEENKO[1], A.P. ZAJOGIN

Belarussian State University, Minsk
[1]SSI «Powder Metallurgy Institute», Minsk, Belarus

STUDY OF PROCESSES DURING SPRAYING OF NANFOILM RESISTORS FROM ZINC OXIDES DOPED WITH COPPER, DURING LASER SPRAYING OF ZINC AND COPPER IN THE AIR ATMOSPHERE

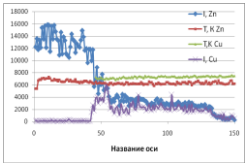
The processes during deposition of gas-sensitive nanofilm resistors from copper oxides doped with zinc oxides were studied using the method of ablation with dual laser pulses of a hybrid target consisting of zinc C0 and copper M2 plates glued together in an air atmosphere. The resistor is sprayed onto a 300 micron wide track made of copper foil on foiled fiberglass laminate. The sensitivity parameters of the sensor for ammonia, water, and acetic acid were assessed.

Плёнки оксидов цинка легированных медью, оловом, железом хорошо зарекомендовали себя в качестве чувствительного слоя газовых сенсоров.

Цель работы состояла в том, чтобы показать возможность и определить условия для получения методом последовательного воздействия сериями сфокусированных сдвоенных лазерных импульсов

на гибридную мишень, состоящую из пластинок цинка и меди, в воздушной атмосфере наноплёнок из оксидов цинка, легированных оксидами меди, для использования их в качестве газовых сенсоров. Для проведения исследований использовали лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1.

Результаты исследований по зависимости интенсивности линий Zn (481,05 нм) и Cu (324,754 нм) от количества импульсов для угла напыления 65^0 при последовательном воздействии сдвоенных лазерных импульсов на гибридную мишень, состоящую из склеенных между собой пластинок из цинка Ц0 и меди М2, на дорожку шириной 300 мкм изготовленной в медной фольге на стеклотекстолите в атмосфере воздуха приведены на рис. 1*а*. Энергии импульсов 53 мДж, интервал между импульсами 10 мкс. Ход процессов и качество напыления существенно зависит от температуры в лазерном факеле, направляемом на подложку. Температура электронов в лазерном факеле определена методом Орнштейна по линиям цинка (481,05 и 330,85 нм) и меди 510,552 и 515,324 нм). Результаты приведены на рис. 1*а*. Изменяя количество лазерных импульсов в серии возможно целенаправленно менять состав прекурсоров для изготовления тех или иных наноплёнок.



а



б



в

Рис. 1. Зависимость интенсивности линий и температуры плазмы от количества импульсов (*а*); изображение поверхности мишени после последовательного напыления оксидов цинка и меди (*б*); напыление на стекле (*в*)

Используя полученные выше результаты, мы провели исследования процессов напыления наноплёнок. Изображения поверхности мишени с напыленной плёнкой, полученные с помощью микроскопа Webbers, увеличение 50 раз, приведены на рис. 1*б*. Изображение поверхности стекла с нанесённой плёнкой (микроскоп Биолам, увеличение в 375 раз), приведены на рис. 1*в*.

Начальное сопротивление плёнки с рис. 1*б* более 1 ГОм при комнатной температуре. Плёнка хорошо реагирует на пары NH_3, относительно слабо на воду и практически не чувствует пары уксусной кислоты.

УДК 535(06)+004(06)

М.Н. КОВАЛЕНКО, Н.А. АЛЕКСЕЕНКО[1], Е.С. ВОРОПАЙ,
Л.В. МАРКОВА[1], А.П. ЗАЖОГИН
Белорусский государственный университет, Минск
[1]Институт порошковой металлургии, Минск, Беларусь

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОПОРОШКОВ-ПРЕКУРСОРОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОКЕРАМИК ТИПА $Fe_xMg_{1-x}Al_2O_4$, ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА СПЛАВЫ АМг2 и Мг95 СДВОЕННЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ В АТМОСФЕРЕ ВОЗДУХА

Исследованы процессы образования смешанных нанопорошков оксидов Al, Fe и Mg при воздействии сдвоенных лазерных импульсов на гибридную мишень, состоящую из пластинок сплавов алюминия АМг2 (Fe – 0,5 %) и магния Мг95, склеенных между собой. Показана возможность получения нанопорошков-прекурсоров для получения нанокерамик типа $Fe_xMg_{1-x}Al_2O_4$. Размер наночастиц в порошке порядка 30 - 45 нм. Частицы слабо агломератированы.

M.N. KOVALENKO, N.A. ALEKSEENKO[1], E.S. VOROPAY,
L.V. MARKOVA[1], A.P. ZAJOGIN
Belarussian State University, Minsk
[1]SSI «Powder Metallurgy Institute», Minsk, Belarus

RESEARCH OF THE PROCESSES OF OBTAINING NANOPOWDERS-PRECURSORS FOR OBTAINING NANOCERAMICS OF THE $Fe_xMg_{1-x}Al_2O_4$ TYPE, UNDER INFLUENCE ON AMg2 and Mg95 ALLOYS BY DUAL LASER PULSES IN THE AIR ATMOSPHERE

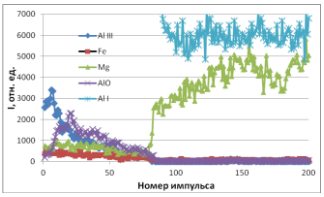
The processes of formation of mixed nanopowders of Al, Fe and Mg oxides under the influence of dual laser pulses on a hybrid target consisting of aluminum AMg2 (Fe – 0.5 %) and magnesium Mg95 alloy plates glued together were studied. The possibility of obtaining precursor nanopowders for the production of nanoceramics of the $Fe_xMg_{1-x}Al_2O_4$ type has been demonstrated. The size of nanoparticles in the powder is about 30 - 45 nm. The particles are weakly agglomerated.

Одно из самых актуальных на сегодняшний день применений нанопорошков – изготовление различных специальных видов керамик, включая оптические, которые могут быть как активными средами, так и

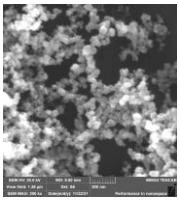
другими элементами (например, модуляторы добротности) для твердотельных лазеров.

Цель работы состояла в том, чтобы показать возможность и определить условия для получения методом последовательного воздействия сериями сфокусированных сдвоенных лазерных импульсов на гибридную мишень, состоящую из пластинок алюминия АМг2 (Fe – 0,5 %) и магния Мг95 в воздушной атмосфере получения нанопорошков-прекурсоров для получения нанокерамик типа $Fe_xMg_{1-x}Al_2O_4$. Для проведения исследований использовали лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1.

На рис. 1*а* представлены результаты по зависимости интенсивности линий атомов Al, Fe и Mg, ионов Al и полос AlO от количества импульсов, энергии импульсов 53 мДж, интервал между ними 10 мкс.



а



б

Рис. 1. Зависимость интенсивности линий ионов Al III (452,92 нм), атомов Mg I (518,47 нм) и Fe I (438,35 нм), полосы радикала AlO (484,21 нм), от количества импульсов (*а*); СЭМ-изображения наночастиц и агломератов из Al, оксидов алюминия, магния и железа (*б*)

Используя полученные выше результаты, мы провели исследования процессов получения нанопорошков. Энергия импульсов излучения 53 мДж, интервал между ними 10 мкс. СЭМ-изображения наночастиц и агломератов из Al, оксидов алюминия, магния и железа полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения MIRA3 с рентгеноспектральным микроанализатором EDX X-Max представлены на рис. 1*б*.

Образование кластеров $Fe_xMg_{1-x}Al_2O_4$ происходит за счёт реакции слипания различных субоксидов Al, оксидов Fe и Mg при турбулентном их перемешивании в лазерном факеле на выходе из микроканала. При конденсации ионы железа получают возможность встраиваться в кристаллическую решётку шпинели вместо ионов Mg^{2+} и имеют валентность равную двум. Изменяя толщину пластинок или количество лазерных импульсов в серии возможно целенаправленно менять состав порошков-прекурсоров для изготовления специальных нанокерамик.

Ю.К. СЕДОВА[1], С.Е. МИНАЕВ[1,2], Е.О. ЕПИФАНОВ[1], Д.В. ЖУЧКОВА[3,4], С.П. СЫСОЛЯТИН[3,4,5], В.П. МИНАЕВ[6], В.И. ЮСУПОВ[1], Н.В. МИНАЕВ[1]

[1]*Институт фотонных технологий ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Троицк*

[2]*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

[3]*Российский университет дружбы народов, Москва*

[4]*Клиника «Эндостом», Москва*

[5]*Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва*

[6]*НТО «ИРЭ-Полюс», Фрязино*

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРА НА Tm-АКТИВИРОВАННОМ ВОЛОКНЕ ДЛЯ ЛИТОТРИПСИИ СЛЮННЫХ КАМНЕЙ

Демонстрируются новые подходы в литотрипсии, связанные с использованием излучения наносекундного лазера на Tm-активированном волокне с длинной волны 1.94 мкм. Исследование проведено на гипсовых фантомах и сиалолитах. Определены параметры лазерного воздействия, обеспечивающие высокие скорости литотрипсии без существенного нагрева окружающих тканей. Показано, что механизм действия наносекундного лазерного излучения поглощаемого в воде диапазона при дроблении камней связан с выгоранием связующего органического материала сиалолита и взрывным кипением воды.

Yu.K. SEDOVA[1], S.E. MINAEV[1,2], E.O. EPIFANOV[1], D.V. ZHUCHKOVA[3,4], S.P. SYSOLYATIN[3,4,5], V.P. MINAEV[6], V.I. YUSUPOV[1], N.V. MINAEV[1]

[1]*Institute of Photonic Technologies FSRC «Crystallography and Photonics» of the RAS, Troitsk*

[2]*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)*

[3]*Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow*

[4]*Endostom Clinic, Moscow*

[5]*Burnazyan Federal Medical Biophysical Center of FMBA of Russia, Moscow*

[6]*IRE-Polus Corporation, Fryazino*

PROSPECTS OF USING A Tm ACTIVATED PULSED FIBER LASER FOR LITHOTRIPSY OF SALIVARY STONES

This paper demonstrates new approaches in lithotripsy associated with the use of nanosecond laser radiation of Tm activated fiber with a wavelength of 1.94 microns. The

study was carried out on Bego phantoms (Bego Stones) and sialoliths. The parameters of laser exposure that provide high rates of lithotripsy without significant heating of the surrounding tissues are determined. It is shown that the mechanism of action of nanosecond laser radiation which is well absorbed in water during stone crushing is associated with sialolith binding organic material burning and explosive water boiling.

Слюннокаменная болезнь или сиалолитиаз – серьёзное заболевание больших слюнных желёз, которое возникает в результате закупоривания протоков слюнными камнями [1]. Это заболевание представляет большую проблему, поскольку приводит к дисфункции желёз и является наиболее частой причиной их удаления [2, 3]. Особенности проявления болезни зависят от диаметра и локализации конкремента [4]. В настоящее время самыми широко используемыми методами для удаления камней являются лазерная и пневматическая литотрипсии [5]. При этом лазерная литотрипсия, являясь мощным, эффективным и безопасным методом фрагментации камней имеет преимущества в более низкой частоте осложнений [6]. К недостаткам метода следует отнести продолжительность операции, а также ожог мягких тканей, окружающих сиалолит [7]. Кроме того, эффективность фрагментации снижается из-за возникновения эффекта ретропульсии (отскок камня от торца волокна) [8]. Настоящая работа направлена на поиск новых режимов для лазерной литотрипсии. Цель работы заключалась в исследовании возможности применения импульсного наносекундного лазера на Tm-активированном волокне для оптимизации процесса лазерного дробления сиалолитов. Показано, что импульсный режим оптимален для дробления сиалолитов, за счёт возможности поддержания приемлемого уровня температуры вокруг камня и обеспечения достаточной скорости дробления.

Список литературы

1. Schapher M., et al. Neutrophil extracellular traps promote the development and growth of human salivary stones // Cells. 2020. V. 9. No. 9. P. 2139.

2. Marchal F., Dulguerov P. Sialolithiasis management // Arch. Otol. 2003. V. 129. P. 951-956.

3. Williams M.F. Sialolithiasis // Otolaryngol. Clin. North Am. 1999. V. 32. No. 5. P. 819-834.

4. Lustmann J., Regev E., Melamed Y. Sialolithiasis // Int. J. Oral Maxillofac. Surg. 1990. V. 19. No. 3. P. 135-138.

5. Koch M., et al. Intraductal lithotripsy in sialolithiasis using the calculase III™ Ho:YAG laser: first experiences // Lasers Surg. Med. 2021. V. 53. No. 4. P. 488-498.

6. Sun Y., et al. Pneumatic lithotripsy versus laser lithotripsy in the endoscopic treatment of ureteral calculi // J. Endourol. 2001. V. 15. No. 6. P. 587-590.

7. Sysolyatin S.P., et al. Endosialoscopic diagnosis and treatment of sialolithiasis // Sib. Nauchnyj Med. Zhurnal. 2020. V. 40. No. 1. P. 45-52.

8. Zhuchkova D.V., Sysolyatin S.P., Bannikova K.A. The first experience of laser lithotripsy in sialolithiasis // Rudn J. Med. 2022. V. 26. No. 2. P. 170-179.

УДК 535(06)+004(06)

П.Е. ТИМЧЕНКО[1,2], Е.В. ТИМЧЕНКО[1,2], Н.А. РЯБОВ[2],
О.О. ФРОЛОВ[1], Л.Т. ВОЛОВА[2], С.С. ИВАНОВ[1]
[1]Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева
[2]Самарский государственный медицинский университет

КОМПЛЕКСНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ СОСТАВА ГИДРОГЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ТКАНЕЙ ЧЕЛОВЕКА ДЛЯ 3D-БИОПРИНТИНГА

В данной работе с помощью комплекса оптических методов были проведены исследования образцов гидрогелей коллагенсодержащего материала на разных этапах их изготовления для 3D-биопринтинга. Показана сохранность основных органических компонентов в гидрогелях при их производстве из лиофилизированной костной ткани человека торговой марки «Лиопласт»®.

P.E. TIMCHENKO[1,2], E.V. TIMCHENKO[1,2], N.A. RYABOV[2],
O.O. FROLOV[1], L.T. VOLOVA[2], S.S. IVANOV[1]
[1]Samara National Research University
[2]Samara State Medical University

A COMPREHENSIVE OPTICAL METHOD FOR DETERMINING THE LOCATION OF A HYDROGEL STATION BASED ON HUMAN TISSUES FOR 3D BIOPRINTING

This work used optical methods to study the samples of collagen-containing hydrogels for 3D bioprinting at the different production process steps. Integrity of essential organic components has been shown in the hydrogels manufactured from Lioplast® freeze-dried human bone tissue.

На современном этапе развития регенеративной медицины актуальным направлением является биопечать тканей с использованием гидрогелей, полученных на основе аллогенного материала в комбинации с клетками самого пациента. [1, 2].

Целью данной работы является оценка состава гидрогелей на основе тканей человека для 3D-биопринтинга с помощью таких оптических методов, как спектроскопия комбинационного рассеяния (КР) и ИК-фурье спектроскопия. Материалами исследования являлись 4 группы образцов: I – минерализованная костная ткань, II – деминерализованная костная ткань, III – гидрогель на основе коллагенсодержащего материала (жидкая

форма), IV – лиофилизированный коллагенсодержащий материал (лиофилизат).

Источником разрабатываемого гидрогеля являлась аллогенная костная ткань, деминерализованная и предварительно очищенная по запатентованной технологии «Лиопласт®», которую переводили в гелеобразное состояние, получая коллагенсодержащий материал, с последующей лиофилизацией.

Метод спектроскопии КР был реализован с помощью экспериментального стенда, подробно описанного в работе [3]. Последующая обработка полученных спектров КР была выполнена в программе Mathematica, на основе ресурса «Raman tool v.1.0.175». В качестве дополнительного метода анализа биоматериалов проводилась ИК-фурье-спектроскопия образцов, на приборе ФСМ 2201 («ИНФРАСПЕК», Россия).

С помощью оптических методов был проанализирован гидрогель аллогенного коллагенсодержащего материала на разных стадиях его обработки. Исходя из полученных спектральных характеристик, можно говорить о полном удалении минерального компонента костной ткани из исследуемых образцов и сохранности коллагеновой основы. В дальнейшем, исследуемый в работе аллогенный коллагенсодержащий гидрогель, будет использоваться для формирования органического матрикса опорных тканей (костной и хрящевой) в направлении 3D-биопринтинга.

Установлено, что с помощью методов рамановской и ИК-спектроскопии можно успешно проводить мониторинг оценки качества получаемого продукта на всех этапах разрабатываемой технологии его получения.

Список литературы

1. Tsiklin I.L., Pugachev E.I., Kolsanov A.V., Timchenko E.V., Boltovskaya V.V., Timchenko P.E., Volova L.T. Biopolymer material from human spongiosa for regenerative medicine application // Polymers. 2022. V. 14 (5). P. 941.

2. Милюдин Е.С., Цурова Л.М., Николаева Г.А. и др. Особенности репарации аллогенных орбитальных биоимплантатов // Медицинский вестник Башкортостана. 2017. Т. 12. № 2 (68). С. 113-116.

3. Timchenko E.V., Timchenko P.E., Pisareva E.V., Daniel M.A., Volova L.T., Fedotov A.A., Frolov O.O., Subatovich A.N. Optical analysis of bone tissue by Raman spectroscopy in experimental osteoporosis and its correction using allogeneic hydroxyapatite // Journal of Optical Technology. 2020. V. 87 (3). P. 161-167.

УДК 535(06)+004(06)

П.А. РУДИ[1,2], А.Г. ЕФРЕМОВ[1,2], Г.С. РОГОЖНИКОВ[2]
[1]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (филиал), Саров, Нижегородская обл.
[2]Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Нижегородская обл.

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

Проведены экспериментальные исследования по взаимодействию непрерывного излучения с длиной волны 2,14 мм с образцами для выявления спектральных особенностей (паттернов) в широкой полосе частот (2 ГГц). Исследование направлено на изучение механизмов дистинкции тканей различных типов и тканевых структур.

P.A. RUDI[1,2], A.G. EFREMOV[1,2], G.S. ROGOZHNIKOV[2]
[1]Sarov Branch of Lomonosov Moscow State University, Nizhny Novgorod region
[2]All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Nizhny Novgorod region

SPECTRAL FEATURES STUDY OF BIOLOGICAL TISSUES IN THE MILLIMETER WAVELENGTH RANGE

Experimental studies have been carried out on the interaction of continuous radiation with a wavelength of 2.14 mm with samples to identify spectral features (patterns) in a wide frequency band (2 GHz). The research is aimed at studying the mechanisms of distinction of tissues of various types and tissue structures.

В настоящее время в области высокотехнологичного медицинского приборостроения всё больший интерес вызывают разработки, использующие неинвазивные способы диагностики патологий, в том числе связанные с использованием электромагнитного излучения разных частотных диапазонов [1]. До последнего времени «белым пятном» оставался терагерцовый промежуток – от 0,1 до 10 ТГц (30 мкм – 3 мм), связанный с сильным поглощением терагерцового излучения водой. Так как насыщенность биологических тканей водой практически приравнивает их к чистой водной среде, это не позволяет излучению субмиллиметрового крыла терагерцового диапазона (30 мкм – 1 мм) глубоко проникать в ткань, и тем более эффективно отражаться и рассеиваться назад [2].

Немного другая ситуация обстоит с миллиметровым крылом – здесь ширина «окон пропускания» может быть существенно выше, да и средняя мощность миллиметровых терагерцовых источников на порядки превосходит мощность субмиллиметровых.

Экспериментально исследованы биологические ткани и тканевые структуры – здоровые и содержащие искусственно вызванные патологии, а также их фантомы, для разработки методики дистинкции по спектральным особенностям в области 2 мм (частотный диапазон 139 - 141 ГГц) с использованием стенда на основе непрерывного источника терагерцового излучения на базе лавиннопролётного диода и умножителей частоты (P = 20 мВт), телескопа из внеосевых параболических зеркал и высокочувствительного пироприёмника.

Предложены методики по выявлению спектральных паттернов при измерении пропускания, рассеяния и отражения терагерцового излучения от образцов биологических тканей и модельных сред и их сравнительному анализу с литературными данными.

Список литературы

1. Рогожников Г.С., Любынская Т.Е. Разработка комплекса инвазивной малотравматичной оптической биопсии // X Международная конференция по фотонике и информационной оптике. М.: НИЯУ МИФИ, 2021. С. 321-322.

2. Казаринов К.Д. Биологические эффекты электромагнитного поля терагерцового диапазона // Электронная техника. Серия. 2009. Т. 1. С. 48-58.

УДК 535(06)+004(06)

Ю.В. ВОЙТЕШОНОК, Д.В. ШИТЦ
Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград

МЕДИЦИНСКИЙ ОЗОНАТОР ЦИКЛИЧЕСКОГО ТИПА ДЛЯ ОБРАБОТКИ СЕПТИЧЕСКИХ РАН

Приведены результаты разработки блока управления медицинского прибора, используемого для проведения озонотерапии септических ран. Через герметичную камеру, накладываемую на рану пациента, циркулирует воздух, обогащаемый озоном. Прилегание камеры обеспечивается в системе понижением давления относительно атмосферного. Блок управления обеспечивает работу системы и дозирование процедуры.

U.V. VOYTESHONOK, D.V. SCHITZ
Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad

MEDICAL CYCLIC OZONATOR FOR SEPTIC WOUND TREATMENT

The results of development of the control unit of a medical device used for ozone therapy of septic wounds are presented. Air enriched with ozone circulates through a sealed chamber applied to the patient's wound. The sealing of the chamber is provided in the system by lowering the pressure relative to atmospheric pressure. The control unit ensures system operation and dosing of the procedure.

В данной работе в качестве источника озона используется фотохимический озонатор, изготовленный из металлической трубы с помещённой в него соосно ксеноновой эксимерной DBD-лампой. Спектр лампы приведён на рис. 1. При облучении воздуха воздействие излучения происходит на кислород, который поглощает всё VUV-излучение в слое не более 5 мм [1 - 3]. Образовавшийся озон прокачивается через замкнутый цикл системы.

Целью работы является разработка блока управления циклического озонатора, с помощью которого можно контролировать и поддерживать давление в камере и длительность процедуры, а также регулировать концентрацию озона. На рис. 2. приведена структурная схема разрабатываемого прибора. При установке необходимой длительности процедуры включается лампа *5* и циркуляционный вентилятор *6*. Создаётся давление ниже атмосферного для плотного прилегания камеры *7* к коже пациента. В течение всей процедуры поддерживается

установленное значение давления. При разгерметизации процедура прерывается. По завершении процедуры давление выравнивается до уровня атмосферного, а насос *6* продолжает работать некоторое время для вентиляции системы. Использованный ресурс излучателя рассчитывается исходя из времени процедуры и инкрементируется во внутреннюю энергонезависимую память блока управления.

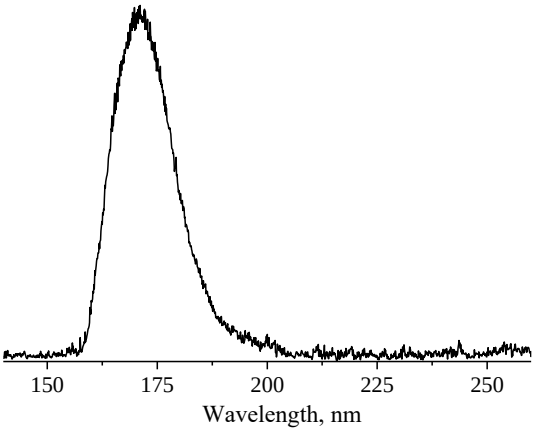


Рис. 1. Спектр излучения эксимерной лампы

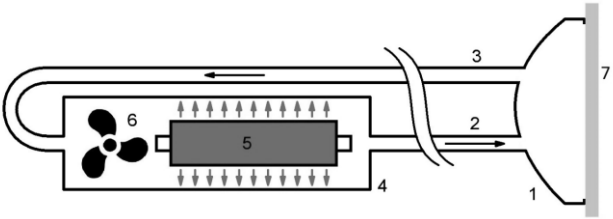


Рис. 2. Структурная схема установки

Список литературы

1. Bocci V. The Clinical Application of Ozon e Therapy // In: OZONE. Springer, Dordrecht, 2010. P. 97-232.

2. Dhamnaskar S., Gobbur N., Koranne M., Vasa D. Prospective comparative observational study of the safety and efficacy of topical ozone gas therapy in the healing of diabetic foot ulcers versus conventional wound treatment alone // Surg. J. 2021. V. 7. P. e226-e236.

3. Morykwas M.J., Argenta L.C., Shelton-Brown E.I., McGuirt W. Vacuum-assisted closure: a new method for wound control and treatment: animal studies and basic foundation // Ann Plast Surg. 1997. V. 38. P. 553-562.

УДК 535(06)+004(06)

Е.В. ТИМЧЕНКО[1,2], П.Е. ТИМЧЕНКО[1,2], М.С. АЛЕХИН[1],
Е.В. ПИСАРЕВА[1], М.Ю. ВЛАСОВ[1,2], О.О. ФРОЛОВ[1], Н.А. КЛЕНОВА[1]
[1]Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева
[2]Самарский государственный медицинский университет

ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СОСТАВА КОМБИНИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ БАКТЕРИАЛЬНОЙ БИОЦЕЛЛЮЛОЗЫ

В данной работе представлены результаты исследований по оценке состава различных комбинированных материалов, на основе бактериальной целлюлозы, с помощью метода спектроскопии комбинационного рассеяния и микроскопического анализа. В результате проведённых исследований были установлены основные различия в спектрах КР, между исследуемыми группами. Был разработан алгоритм идентификации объектов на основе бактериальной целлюлозы. Показано, что с помощью метода спектроскопии КР можно проводить экспресс-анализ состава исследуемых образцов на основе бактериальной целлюлозы. Результаты исследований подтверждены микроскопическим анализом.

E.V. TIMCHENKO[1,2], P.E. TIMCHENKO[1,2], M.S. ALEKHIN[1],
E.V. PISAREVA[1], M.Yu. VLASOV[1,2], O.O. FROLOV[1] , N.A. KLENOVA[1]
[1]Samara National Research University
[2]Samara State Medical University

OPTICAL METHODS FOR EVALUATING THE COMPOSITION OF COMBINED MATERIALS BASED ON BACTERIAL CELLULOSE

This paper presents the results of a study assessing the composition of various combined materials based on bacterial cellulose using Raman spectroscopy and microscopic analysis. As a result of the studies, the main differences in the Raman spectra between the studied groups were established. An algorithm for identifying objects based on bacterial cellulose was developed. It has been shown that using the Raman spectroscopy method it is possible to carry out a rapid analysis of the composition of the studied samples based on bacterial cellulose. The research results were confirmed by microscopic analysis.

Бактериальная целлюлоза (БЦ) обладает рядом преимуществ, по сравнению с растительной целлюлозой, это чистота, высокая пористость,

проницаемость для жидкости и газов, повышенная водопоглощающая способность и механическая прочность [1]. Однако, при изготовлении комбинированных материалов на основе БЦ необходимо контролировать состав для лучшей их приживаемости. В качестве методов контроля состава этих материалов могут быть использованы микроскопический анализ [2, 3] и спектроскопия комбинационного рассеяния [4].

Целью данной работы является применение комплекса оптических методов для оценки состава комбинированных материалов на основе бактериальной биоцеллюлозы. В работе была исследована бактериальная целлюлоза (БЦ), а также комбинированные материалы на основе БЦ, включающие в состав различные добавки, такие как пектин, 1.3-диоктил-4-метилимидозалий бромид. Метод спектроскопии КР был реализован с помощью стенда, подробно описанного в работе [4].

В результате проведённых исследований с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния, а также с использованием LDA и дисперсионного анализа были получены спектральные различия между исследуемыми группами бактериальной целлюлозы с добавлением пектина и без, а также с добавлением 1.3-диоктил-4-метилимидозалий бромид. Было установлено, что основные различия в спектрах КР проявляются на следующих линиях ~ 1745, 1591 и 1092 $см^{-1}$, соответствующих колебаниям бактериальной целлюлозы. Результаты исследований подтверждены микроскопическим анализом.

Был разработан алгоритм идентификации объектов на основе бактериальной целлюлозы. Установлено, что в случае, если амплитуда линии КР ~ 1745$см^{-1}$ ниже 0.075 отн. ед, то это спектр бактериальной целлюлозы без содержания пектина, если же амплитуда линии 1277 $см^{-1}$ равна 0.075 отн. ед то это спектр бактериальной целлюлозы с содержанием пектина. Таким образом, с помощью метода спектроскопии КР, можно проводить экспресс-анализ состава исследуемых образцов на основе бактериальной целлюлозы.

Список литературы

1. Reiniati I., Hrymak A.N. Bacterial Cellulose Nanocrystals: Production and Application // Electronic Thesis and Dissertation Repository.2017. 4826.

2. Скворцова З.Н., Громовых Т.И., Грачев В.С., Траскин В.Ю. Физико-химическая механика бактериальной целлюлозы // Коллоидный журнал, 2019. Т. 81. № 4. С. 441-452.

3. Болотова К.С., Чухчин Д.Г. Морфологические особенности фибриллярной структуры растительной и бактериальной целлюлозы //Лесной журнал. 2016. № 6.

4. Timchenko E.V., Timchenko P.E., Pisareva E.V., Daniel M.A., Volova L.T., Fedotov A.A., Frolov O.O., Subatovich A.N. Optical analysis of bone tissue by Raman spectroscopy in experimental osteoporosis and its correction using allogeneic hydroxyapatite // Journal of Optical Technology. 2020. V. 87 (3). P. 161-167.

А.В. БЕЛАШОВ, А.А. ЖИХОРЕВА, Д.М. БЕЛЬТЮКОВА,
Т.Н. БЕЛЯЕВА[1], А.В. САЛОВА[1], И.К. ЛИТВИНОВ[1],
Е.С. КОРНИЛОВА[1], И.В. СЕМЕНОВА, О.С. ВАСЮТИНСКИЙ
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
[1]Институт цитологии РАН, Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОТОДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПАРАМЕТРЫ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ ФОТОСЕНСИБИЛИЗАТОРА РАДАХЛОРИН В ЖИВЫХ КЛЕТКАХ В РЕЗУЛЬТАТЕ ЧАСТИЧНОГО ФОТООБЕСЦВЕЧИВАНИЯ

В результате количественного анализа время-разрешённых сигналов флуоресценции фотосенсибилизатора в живых клетках, полученных с помощью метода FLIM-микроскопии, было установлено, что фотодинамическое воздействие приводит к уменьшению интенсивности и времени затухания флуоресценции Радахлорина в клетках. Увеличение дозы фотодинамического воздействия, как за счёт большей интенсивности лазерного излучения, так и в результате повышения длительности такого воздействия, приводит к более выраженному уменьшению времени затухания флуоресценции. Возможными причинами наблюдаемого изменения временных параметров флуоресценции при частичном фотообесцвечивании Радахлорина могут быть как увеличение количества свободных радикалов, способствующих тушению флуоресценции, так и изменение вклада различных компонент фотосенсибилизатора в наблюдаемый сигнал флуоресценции.

A.V. BELASHOV, A.A. ZHIKHOREVA, D.M. BELTUKOVA,
T.N. BELYAEVA[1], A.V. SALOVA[1], I.K. LITVINOV[1],
E.S. KORNILOVA[1], I.V. SEMENOVA, O.S. VASYUTINSKII
Ioffe Physical Technical Institute of the RAS, Saint-Petersburg
[1]Institute of Cytology of the RAS, Saint-Petersburg

INVESTIGATION OF PHOTODYNAMIC TREATMENT IMPACT ON INTRACELLULAR RADACHLORIN FLUORESCENCE LIFETIME DUE TO ITS PARTIAL PHOTOBLEACHING

Quantitative analysis of time-resolved fluorescence signals of Radachlorin photosensitizer accumulated in living cells, obtained by FLIM microscopy, has shown that photodynamic treatment leads to a decrease of Radachlorin fluorescence intensity

and lifetime. An increase of treatment dose due to either higher laser radiation intensity or longer irradiation time results in a more pronounced decrease of the observed fluorescence lifetime. The observed phenomena may be due to PDT-induced generation of fluorescence-quenching free radicals or variation in contributions from the three components of the photosensitizer to the observed time-resolved fluorescence signals.

Важным преимуществом фотодинамической терапии как современного метода лечения онкологических заболеваний является возможность проводить одновременный мониторинг и лечение злокачественных тканей посредством их освещения в полосе поглощения фотосенсибилизатора и наблюдения его сигнала флуоресценции. Часто распределение интенсивности флуоресценции фотосенсибилизатора используется лишь для детектирования преимущественных мест его накопления, хотя анализ спектральных и временных характеристик флуоресценции может дать дополнительную информацию о процессе терапии.

Так, анализ времени затухания флуоресценции может зависеть от множества характеристик микроокружения молекул фотосенсибилизатора: полярности, кислотности, вязкости среды, присутствия в ней тушителей флуоресценции и других. В данной работе нами был проведён анализ время-разрешённых сигналов флуоресценции фотосенсибилизатора Радахлорин, накопленного в клетках линии HeLa после их 24-часовой инкубации в растворе фотосенсибилизатора. Для получения пространственных распределений времени затухания флуоресценции фотосенсибилизатора нами был использован метод FLIM-микроскопии при возбуждении Радахлорина импульсным лазерным излучением на длине волны 405 нм. Одноэкспоненциальный фитинг сигналов флуоресценции показал, что среднее время затухания флуоресценции в клетках в нормальном состоянии составляет 4.6 нс, в то время как после фотодинамического воздействия с суммарными дозами 3.8, 6.5 и 9.2 Джоулей этот параметр уменьшается до 4.3, 3.9 и 3.6 нс соответственно. Из-за фотообесцвечивания уменьшается и интенсивность его флуоресценции. Аналогичный эффект наблюдается и при освещении водных растворов фотосенсибилизатора: процесс фотообесцвечивания Радахлорина сопровождается нелинейным уменьшением времени затухания флуоресценции, что может быть вызвано образованием свободных радикалов, тушителей флуоресценции, или перераспределением вклада отдельных компонентов Радахлорина в общий наблюдаемый сигнал флуоресценции.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 21-72-10044.

УДК 535(06)+004(06)

Ю.Д. ИТЯКСОВ[1], П.Е. ТИМЧЕНКО[1,2], Е.В. ТИМЧЕНКО[1,2], О.О. ФРОЛОВ[1], Е.В. ПИСАРЕВА[1], Э.М. ТЧАНГ[1], И.Н. ЛЕМБА[1], М.Ю. ВЛАСОВ[1,2]

[1]Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева

[2]Самарский государственный медицинский университет

ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ КОСТНОЙ ТКАНИ ЖИВОТНЫХ ПРИ ОДНО- И ДВУКРАТНОМ ВВЕДЕНИИ МИНЕРАЛЬНОГО КОСТНОГО КОМПОНЕНТА

Представлены результаты применения метода спектроскопии комбинационного рассеяния для оценки функционального состояния костной ткани животных после одно- и двукратного введения минерального костного компонента (МКК). В качестве объектов исследований была использованы костная ткань и сыворотка крови свиней. Дополнительным методом анализа являлся биохимический анализ. В результате исследований установлено, что МКК не оказывает негативного влияния на костную ткань свиней как при однократном, так и при двухкратном введении.

Yu.D. ITYAKSOV[1], P.E. TIMCHENKO[1,2], E.V. TIMCHENKO[1,2], O.O. FROLOV[1], E.V. PISAREVA[1], E.M. TCHANG[1], I.N. LEMBA[1], M.Yu. VLASOV[1,2]

[1]Samara National Research University

[2]Samara State Medical University

OPTICAL METHOD FOR ASSESSING ANIMAL BONE TISSUE WITH SINGLE AND DOUBLE ADMINISTRATION OF A MINERAL BONE COMPONENT

The results of using the Raman spectroscopy method to assess the functional state of animal bone tissue after a single and double administration of a mineral bone component (MCC) are presented. Bone tissue and blood serum of pigs were used as objects of research. Biochemical analysis was used as an additional method of analysis. As a result of the studies, it was found that the MCC does not have a negative effect on the bone tissue of pigs with both single and double administration.

Актуальной задачей является поиск новых биотехнологических решений, направленных на коррекцию обменных процессов и восстановление изменённой структурно-функциональной целостности

костной ткани. При разработке биосовместимых материалов аллогенного происхождения в первую очередь должна обеспечиваться их безопасность, способность к остеоинтеграции и обеспечение физиологической регенерации [1]. Одним из перспективных материалов, обладающим большим потенциалом для применения в травматологии, стоматологии и челюстно-лицевой хирургии является минеральный компонент кости (МКК), получаемый путём деминерализации костных тканей человека и животных.

Целью работы является применение спектроскопии комбинационного рассеяния для оценки состояния костной ткани свиней (*Susscrofa*) после однократного и двукратного внутримышечного введения водной суспензии минерального костного компонента. Эксперименты проведены на свиньях породы «Ливенская» массой 13 - 15 кг. Контрольным животным (группа 1) однократно делали внутримышечные инъекции стерильного физиологического раствора. Свиньям экспериментальной группы 2 производили внутримышечные инъекции суспензии аллогенного минерального костного компонента в дозе 100 мг/кг однократно в первый день эксперимента. В третьей группе производили внутримышечные инъекции суспензии минерального костного компонента в дозе 100 мг/кг двукратно в первый и четырнадцатый дни эксперимента. Дальнейшие исследования проводили invitro с помощью метода спектроскопии комбинационного рассеяния СКР, который был реализован с помощью экспериментального стенда подробно описанного в работе [2].

В результате проведённых исследований по влиянию вводимой дозы МКК на состав костной ткани свиней с помощью рамановской спектроскопии было установлено, что вводимая доза МКК (100 мг на кг веса), как при однократном, так и при двухкратном введении препарата не оказывает влияния на состав костной ткани, что отчётливо видно по спектрам КР. Установлено, что во всём исследуемом спектральном диапазоне от 380 - 1900 $см^{-1}$ не наблюдается спектральных изменений между исследуемыми группами.

Результаты исследований подтверждены биохимическим анализом.

Полученные результаты могут быть использованы в дальнейшем в качестве предпосылки для тестирования данного препарата на более крупных животных и перехода к клиническим исследованиям.

Список литературы

1. Kolk A, Handschel J., et al. // J. Craniomaxillofac. Surg. 2012. V. 40 (8). P. 706-718.
2. Timchenko P.E., Timchenko E.V., et. al. // J. of Opt. Techn. 2021. V. 88. Is. 9. P. 485-488.

УДК 535(06)+004(06)

О.В. СТЕПАНОВА, Г.А. КОНОПЛЕВ, А.И. КУЗНЕЦОВ[1],
В. КОРСАКОВ[2], О.С. СТЕПАНОВА, Д.О. ЛЯЛИН,
Н.С. ЛЫФАРЬ, А. ФРОРИП[1]

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
[1]Ldiamon AS, Тарту, Эстония
[2]Jeko Disain OÜ, Тарту, Эстония

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКОГО СЕНСОРА, ОСНОВАННОГО НА БЫСТРОЙ ЖИДКОСТНОЙ ХРОМАТОГРАФИИ БЕЛКОВ И МЕТАБОЛИТОВ, ДЛЯ ОЦЕНКИ СВЕЖЕСТИ РЫБЫ

Оптический сенсор представляет собой проточное устройство с хроматографической колонкой, соединённой с фотометрическим детектирующим модулем в УФ-диапазоне (255 - 265 нм). Определение степени свежести рыбы связано с относительным содержанием метаболитов аденозинтрифосфата (АТФ) в мышечной ткани. По мере того, как рыба теряет свежесть АТФ преобразовывается в метаболиты, которые имеют более высокое время элюации. Была обнаружена корреляция между сроком хранения рыбы и временем элюации метаболитов АТФ. Исследование проводилось на рыбе Белый Амур и карпе.

O.V. STEPANOVA, G.A. KONOPLEV, A.I. KUZNETSOV[1],
V. KORSAKOV[2], O.S. STEPANOVA, D.O. LYALIN,
N.S. LYFAR, A. FRORIP[1]

[1]Saint-Petersburg State Electrotechnical University «LETI»
[2]Ldiamon AS, Tartu, Estonia
[3]Jeko Disain OÜ, Tartu, Estonia

USAGE OF OPTICAL SENSOR BASED ON FAST PROTEIN AND METABOLITE CHROMATOGRAPHY TO ASSESS FISH FRESHNESS

The optical sensor represents a flow device with a chromatographic column connected with photometric detection module in the UV range (255 - 265 nm). The estimation of fish freshness is associated with the relative content of adenosine triphosphate (ATP) metabolites in muscle tissue. As the fish loses its freshness ATP is converted to metabolites that have higher elution time. A correlation was found between duration of fish storing and the elution time of ATP metabolites. The study was conducted on White Amur and Carp fish.

Рыба является довольно скоропортящимся продуктом, поэтому крайне важно наличие устройств, позволяющих провести быструю, объективную и надежную оценку свежести продукта. Общепризнанные методики, такие как определение содержания общего азота летучих оснований (TVB-N), высокоэффективная жидкостная хроматография (HPLC), масс-спектрометрия и ядерно-магнитный резонанс трудоемки и требуют дорогого и сложного оборудования.

Предлагаемый оптический сенсор состоит из буферной емкости, хроматографической колонки PD-10 и детектирующего модуля на основе УФ-светодиода (рис. 1). Преимуществами сенсора являются его компактность и относительно низкая стоимость; пробоподготовка и получение хроматограммы занимает около тридцати минут [1].

Изменение концентрации метаболитов АТФ является надежным показателем степени свежести рыбы [2]. После вылова преобразование АТФ в другие метаболиты в мышечной ткани сопровождается постепенным уменьшением молекулярной массы соединений, что влияет на время протока метаболитов через хроматографическую колонку сенсора – оно увеличивается. Определение свежести производится по получаемой хроматограмме, на которой видны два пика. Первый из них сформирован белками, второй (широкий) образован метаболитами АТФ.

Измерения проводились на рыбе Белый Амур и карпе ежедневно в течение 11 дней после вылова. Между измерениями рыба хранилась в холодильнике при температуре 2 - 4 °C. В обоих случаях увеличивалось время максимума второго пика с увеличением времени хранения (рис. 2).

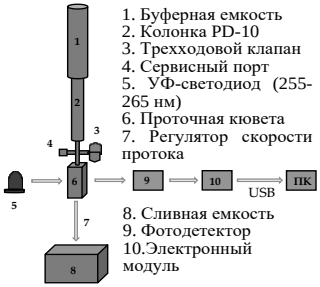


Рис. 1. Схема оптического сенсора

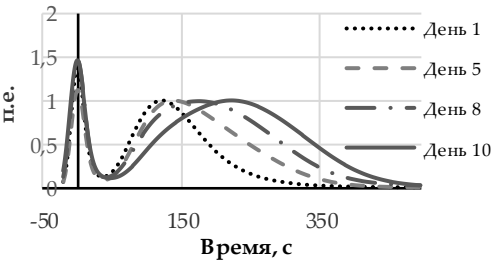


Рис. 2. FPMLC хроматограммы Амура, полученные на 1, 5, 8, 10 день измерений

Список литературы

1. Konoplev G.A., Sünter A., et al. // Engineering Proceedings. 2023. V. 35 (3).
2. Hong H., Regenstein J.M., et al. // Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 2017. V. 57. P. 1787-1798.

УДК 535(06)+004(06)

Д.С. ШУЛБАЕВА[1,2], А.М. КЛЫЧКОВ[1,2], Г.С. РОГОЖНИКОВ[2]
[1]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (филиал), Саров, Нижегородская обл.
[2]Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Нижегородская обл.

ДИАГНОСТИКА ЗЛОКАЧЕСТВЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ШИРОКОПОЛОСНОЙ ВИДИМОЙ И ИНФРАКРАСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Приведены результаты исследований злокачественных образований по in vivo и in vitro диагностике с использованием оптического инвазивного и неинвазивного зондирования в широком спектральном диапазоне 350 - 2500 нм.

D.S. SHULBAEVA[1,2], A.M. KLYCHKOV[1,2], G.S. ROGOZHNIKOV[2]
[1]Sarov Branch of Lomonosov Moscow State University, Nizhny Novgorod region
[2]All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Nizhny Novgorod region

TUMOR DIAGNOSTICS BY MEANS OF BROADBAND VISIBLE AND INFRARED SPECTROSCOPY

Research results concerning in vivo and in vitro diagnostics of tumors by means of optical invasive and non-invasive sounding in wide spectral range 350-2500 nm have been provided.

Здоровые биологические ткани и ткани с патологией имеют различные спектральные особенности (паттерны) из-за различной структуры, а также концентраций составляющих ткань компонент. Каждая компонента по отдельности легко дифференцируема по характерным паттернам, однако в сложноструктурированных тканях, содержащих множество компонент, паттерны накладываются друг на друга, осложняя анализ. Для облегчения процедуры анализа необходимо иметь достаточно широкий спектральный диапазон, чтобы минимизировать вероятность перекрытия линий [1]. Разработан спектрометрический комплекс, который позволяет в режиме реального времени в диапазоне 350 - 2500 нм регистрировать спектры обратного рассеяния в тканях лабораторных животных и анализировать их [2]. Исследованы животные с опухолями различных типов, показана высокая специфичность и чувствительность данной методики.

Список литературы

1. Скрыбыкина А.А. и др. // XII Межд. конф. по фотон. и инф. опт. М.: НИЯУ МИФИ, 2023.
2. Скрыбыкина А.А., Рогожников Г.С. // Ломоносов-2023. Москва, 2023.

Е.В. ТИМЧЕНКО[1,2], П.Е. ТИМЧЕНКО[1,2], А.В. ЛЯМИН[2],
И.В. БАЖУТОВА[2], Д.А. ТРУНИН[2], О.О. ФРОЛОВ[1],
Л.Т. ВОЛОВА[2], А.В. ЗОТОВА[1]
[1]Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева
[2]Самарский государственный медицинский университет

РАМАНОВСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ДЛЯ ЭКСПРЕСС-ДИАГНОСТИКИ СТАФИЛОКОККОВ ПРИ ПАРОДОНТИТЕ

В данной работе методом спектроскопии комбинационного рассеяния исследовались штаммы эпидермального стафилококка с гемолитической активностью и без гемолитической активности. В результате проведённых исследований были установлены основные спектральные отличия исследуемых групп образцов. Для оценки гемолитической активности был использован комплексный анализ с применением методов спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) и математических подходов.

E.V. TIMCHENKO[1,2], P.E. TIMCHENKO[1,2], A.V. LYAMIN[2],
I.V. BAZHUTOVA[2], L.T. VOLOVA[2], D.A. TRUNIN[2],
O.O. FROLOV[1], A.V. ZOTOVA[1]
[1]Samara National Research University
[2]Samara State Medical University

RAMAN SPECTROSCOPY FOR EXPRESS DIAGNOSIS OF STAPHYLOCOCCUS PERIODONTITIS

In this work, the combination scattering spectroscopy method investigated strains of epidermal staphylococcus with hemolytic activity and without hemolytic activity. As a result of the conducted studies the main spectral differences of the studied groups have been established. Complex analysis using combined scattering spectroscopy and mathematical approaches was used to estimate hemolytic activity.

В двадцать первом веке широкое распространение приобрели различные воспалительные заболевания ротовой полости. Одним из потенциальных участников патологического процесса при заболеваниях полости рта могут быть бактерии – стафилококки с определённым фактором патогенности, которые на протяжении последнего столетия являются наиболее значимыми патогенами в медицинской практике.

Ранее уже проводились исследования, посвящённые исследованиям стафилококков спектральными методами [1]. Однако, несмотря на наличие большого количества различных факторов патогенности, к которым можно отнести гемолитическую активность, роль данного микроорганизма в патологии органов полости рта всё ещё слабо изучена [2].

Целью работы являлось применение рамановской спектроскопия для экспресс-диагностики стафилококков при пародонтите.

Объектами исследования выступали 12 штаммов Staphylococcus epidermidis, выделенных из клинического материала пациентов, больных хроническим пародонтитом. Идентификацию выделенных штаммов проводили с помощью метода MALDI-ToF масс-спектрометрии на приборе MicroflexLT (Bruker).

В качестве основного метода исследования штаммов эпидермального стафилококка использовался метод Рамановской спектроскопии, подробно описанный в работе [3]. Дальнейшая обработка спектров комбинационного рассеяния осуществлялась в программе Mathematica, на основе ресурса «Ramantoolv.1.0.175» и дискриминантного анализа.

В результате проведённых исследований были установлены спектральные отличия штаммов эпидермального стафилококка с гемолитической активностью и безгемолитической активности, которые наблюдаются на линии КР ~ 1650 см$^{-1}$ (AmideIvibration (collagen-likeproteins)).

Также, был проведён линейно дискриминантный анализ (LDA) двух исследуемых групп образцов. Дискриминантная функция LD-1 описывает дисперсию на 100 %.

В будущем, полученные результаты могут быть использованы в качестве экспресс-оценки маркеров патогенности стафилококка и других условно-патогенных микроорганизмов полости рта.

Список литературы

1. Witkowska E., Łasica A.M., Nicinski K., Potempa J., Kaminska A. In search of spectroscopic signatures of periodontitis: ASERS based magnetomicrofluidic sensor for detection of porphyromonasgingivalis and aggregatibacteractinomycetemcomitans // ACSSens. 2021. V. 6. P. 1621-1635.

2. Белобородов В.Б., Митрохин С.Д. // Инфекции и антимикробная терапия. 2003. Т. 5. № 1. С. 4-12.

3. Timchenko P.E., Timchenko E.V., Volova L.T., Zybin M.A., Frolov O.O., Dolgushov G.G. Optical assessment of dentin materials // Optical Memory and Neural Networks, 2020. V. 29. No. 4. P. 354-357.

С.Р. ЗУБАРЕВА, А.А. КУНДАЛЕВИЧ, А.Ю. ЗЮБИН, И.Г. САМУСЕВ
Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград

ИССЛЕДОВАНИЕ БАЛТИЙСКОГО ЯНТАРЯ МЕТОДОМ СПЕКТРОСКОПИИ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА

В представляемой работе отражены результаты КР-спектроскопии прибалтийского янтаря из Калининградской области. В работе использовался метод комбинационного рассеяния света, поскольку позволяет точно идентифицировать химический состав янтарей. Также выбранный метод высокочувствителен, поскольку спектральные полосы возникают в результате молекулярных колебаний и строго соответствуют химической структуре янтаря. Спектроскопия комбинационного рассеяния света позволяет различать химические структуры, что очень важно для определения, например, места происхождения янтарей.

S.R. ZUBAREVA, A.A. KUNDALEVICH, A.Yu. ZYUBIN, I.G. SAMUSEV
Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad

INVESTIGATION OF BALTIC AMBER BY RAMAN SPECTROSCOPY

The presented work reflects the results of RAMAN spectroscopy of Baltic amber from the Kaliningrad region. The method of raman scattering of light was used in the work, since it allows us to accurately identify the chemical composition of amber. Also, the chosen method is highly sensitive, since spectral bands arise as a result of molecular vibrations and strictly correspond to the chemical structure of amber. Raman spectroscopy makes it possible to distinguish chemical structures, which is very important for determining, for example, the place of origin of amber.

Янтарь широко распространён и используется во многих сферах деятельности. Он и его производные применяется как при изготовлении ювелирных изделий, так и средств по уходу за кожей. Стоит отметить его важность и для медицины, где его используют в аппаратах по переливанию крови, поскольку кровь дольше не сворачивается в сосудах из янтаря [1]. В связи с этим изучение оптических и физико-химических свойств янтаря является важным для современной науки.

Для исследования спектров комбинационного рассеяния света был использован КРС анализатор Virsa (Великобритания). В ходе эксперимента был использован лазер с длиной волны $\lambda = 785$ нм, что позволяло не детектировать флуоресценцию балтийского янтаря при проведении изменений. При съёмке образцов значения мощность варьировались от 10 до 60 мВт, а время накопления от 10 до 45 с в зависимости от участка съёмки, таким образом были получены достоверные спектры КРС. Были получены характерные максимумы в низкочастотной и высокочастотной областях, характеризующие структуру янтаря и её особенности. В рамках работы были получены разрешённые спектры балтийского янтаря (рис. 1), проведена интерпретация колебаний.

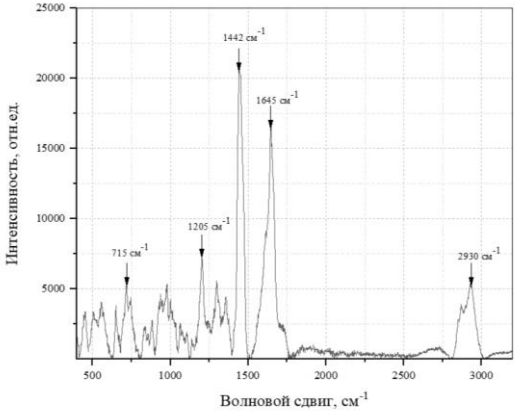


Рис. 1 Спектры балтийского янтаря

В работе показана перспективность использования КР-спектроскопии как эффективного метода для исследования янтаря. В дальнейшем можно будет создать библиотеку спектров разных групп янтаря, что позволит различать янтари разного места происхождения и возраста.

Работа поддержана проектом РНФ № 3-22-10023 «Фундаментальные основы разработки нового метода оценки относительного возраста и географического происхождения ископаемых смол мира на примере балтийского янтаря».

Список литературы

1. Никулин А.А., Храпова С.И., Тебякина Е.А., Рачков А.К., Семенченко М.В. К вопросу о влиянии янтарной кислоты на свертываемость крови и баланс катехоламинов // Фармакол Токсикол. 1988. Т. 51 (3). С. 45-48.

А.А. УШАКОВ[1], К.А. МАМАЕВА[1], С.А. РОМАНОВ[1,2],
Т.В. ДОЛМАТОВ[1], П.А. ЧИЖОВ[1], В.М. ШЕВЛЮГА[1],
В.В. БУКИН[1], С.В. ГАРНОВ[1]
[1]Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва
[2]Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ГЕНЕРАЦИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ СВЕРХСВЕТОВОЙ РАЗРЯДКЕ ПЛОСКОГО ВАКУУМНОГО ФОТОДИОДА

Приведены результаты по измерениям энергии электромагнитного излучения (ЭМИ) в терагерцовом диапазоне при сверхсветовой разрядке вакуумного фотодиода фемтосекундными лазерными импульсами при различных значениях доли эмитируемых зарядов с поверхности катода и различных значениях напряжения, подаваемого между обкладками фотодиода.

A.A. USHAKOV[1], K.A. MAMAEVA[1], S.A. ROMANOV[1,2],
T.V. DOLMATOV[1], P.A. CHIZHOV[1], V.M. SHEVLYUGA[1],
V.V. BUKIN[1], S.V. GARNOV[1]
[1]Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow
[2]National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

GENERATION OF TERAHERTZ RADIATION AT SUPERLUMINAL DISCHARGE OF A FLAT VACUUM PHOTODIODE

The results of measurements of electromagnetic radiation energy in the terahertz range during superluminal discharge of a vacuum photodiode by femtosecond laser pulses at different values of the fraction of emitted charges from the cathode surface and different values of the voltage applied between the photodiode liners are presented.

Терагерцовое (ТГц) излучение нашло огромное применение как в экспериментальных, так и в теоретических задачах. Ранее было показано, что при наклонном падении рентгеновского излучения на поверхность мишени образуется электронная эмиссия, которая формирует электромагнитное излучение (ЭМИ) [1]. В работах [2, 3] предложена методика по усилению излучения при помощи внешнего поля, прикладывая которое энергия имитируемых с поверхности катода электронов резко возрастает, вследствие чего энергия ЭМИ увеличивается. Подобный метод продемонстрировал эффективную

генерацию в СВЧ-диапазоне. Уменьшение времени торможения электронов позволяет генерировать импульсы в более высокочастотные области, в том числе и терагерцовую. Таким образом, меняя конфигурацию фотодиода: расстояние между обкладками, величину внешнего поля, можно получить ЭМИ в ТГц-диапазоне.

Целью работы является исследование способов генерации ТГц-излучения при сверхсветовой разрядке вакуумного фотодиода фемтосекундными лазерными импульсами.

В роли источника терагерцового излучения используется плоский вакуумный фотодиод (рис. 1), конструкция которого представляет собой анод, изготовленный из пластинки нержавеющей стали и, разделённый от него слоем диэлектрического изолятора, катод, представляющий собой сурьмяно-цезиевое покрытие (Cs_3Sb), нанесённое на поверхность входного окна, изготовленного из сапфира. Для формирования электронной эмиссии под углом на фотокатод направляется фемтосекундное лазерное излучение (вторая гармоника титан-сапфирового лазера, центральная длина волны 400 нм, длительность импульсов до 50 фс, энергии импульсов до 1 мДж). Под действием лазерного излучения возникает электронная эмиссия, которая при воздействии внешнего электрического поля (50 - 100 кВ/см) ускоряется и тормозит в тонком слое нержавеющего анода. Регистрация излучения производится с помощью детектора Голея с использованием методики синхронного детектирования (рис. 2).

В работе также было проведено исследование зависимости импульсов ТГц-излучения от напряжённости прикатодного поля и доли эмитируемого заряда с поверхности.

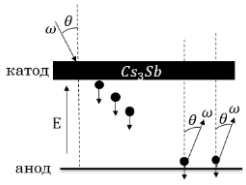


Рис. 1. Схема фотодиода

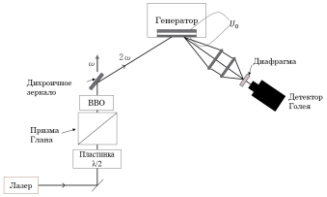


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Список литературы

1. Carron N.J., Longmire C.L. // Transactions on Nuclear Science. 1976. V. 23 (6). P. 1897-1902.

2. Лазарев Ю.Н., Петров П.В. // Письма в ЖЭТВ. 1994. Т. 60 (9). С. 625-628.

3. Brendel V.M., Bukin V.V., Garnov S.V. // Physics of Wave Phenomena. 2014. V. 22 (4). P. 219-222.

УДК 535(06)+004(06)

И.Н. НИКОЛАЕВА[1,2], В.В. КОСТРОМЫКИНА[2],
Г.С. РОГОЖНИКОВ[2]

[1]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (филиал), Саров, Нижегородская обл.

[2]Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Нижегородская обл.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ В МНОГОСЛОЙНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ

Рассмотрены особенности распространения терагерцового излучения через структуры, образованные последовательностью слоёв гомогенных и гетерогенных материалов.

I.N. NIKOLAEVA[1,2], V.V. KOSTROMYKINA[2], G.S. ROGOZHNIKOV[2]

[1]Sarov Branch of Lomonosov Moscow State University, Nizhny Novgorod region

[2]All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Nizhny Novgorod region

STUDY OF TERAHERTZ-BAND RADIATION PROPAGATION IN MULTILAYER DIELECTRIC STRUCTURES

Peculiarities of propagation of terahertz radiation (THz) through the structures making sequences of homogeneous and heterogeneous materials have been observed.

Терагерцовое (ТГц) излучение имеет более высокую глубину проникновения сквозь большинство диэлектрических материалов по сравнению с видимыми и инфракрасными волнами [1], и, следовательно, может эффективно использоваться для исследования многослойных диэлектрических структур [2, 3].

Проведены исследования по зондированию многослойных гомогенных и гетерогенных структур, в том числе диэлектрических покрытий и объёмных дисперсионных объектов с целью определения их оптических свойств и пространственных характеристик. Результатом являются базовые исходные данные для создания оптических элементов с новыми свойствами для терагерцовой и лазерной техники.

Список литературы

1. Рогалин В.Е., Каплунов И.А., Кропотов Г.И. // Оптика и спектроскопия. 2018. Т. 125.
2. Yi M.-W., Kim Y.-C., Yee D.-S., Ahn J.-W. // Journal of the Opt. Soc. of Korea. 2009. V. 13.
3. Withayachumnankul W., Fischer B.M., Abbott D. // Opt. Comm. 2008. P. 2374-2379.

УДК 535(06)+004(06)

Ю.В. КОНОВ[1,2], Д.А. ПЫХТИН[1,2], Р.Г. БИКБАЕВ[1,2],
И.В. ТИМОФЕЕВ[1,2]
[1]Институт физики им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск
[2]Сибирский федеральный университет, Красноярск

ФОТОДЕТЕКТОР ГОРЯЧИХ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА НА ОСНОВЕ ТАММОВСКОГО ПЛАЗМОН-ПОЛЯРИТОНА

Исследована зависимость фоточувствительности фотодетектора горячих электронов для телекоммуникационной области спектра на основе плёнки германия в структуре с таммовским плазмон-поляритоном от материала металлической плёнки.

Yu.V. KONOV[1,2], D.A. PYKHTIN[1,2], R.G. BIKBAEV[1,2],
I.V. TIMOFEEV[1,2]
[1]Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC SB RAS, Krasnoyarsk
[2]Siberian Federal University, Krasnoyarsk

HOT ELECTRON PHOTODETECTOR FOR TELECOMM WAVELENGTH BASED ON TAMM PLASMON POLARITON

The dependence of the photosensitivity of a hot electron photodetector for telecom wavelength based on a germanium film in a structure with a Tamm plasmon polariton on the metal film material is investigated

В последние годы большой интерес вызывает таммовский плазмон-поляритон (ТПП) – состояние света, локализованное на границе металлической плёнки и фотонного кристалла [1]. На основе ТПП созданы такие устройства как лазеры [2], сенсоры [3] и фотодетекторы [4], которые лежат в основе твердотельных лидаров. В связи с этим в данной работе была предложена модель фотодетектора горячих электронов для телекоммуникационной области спектра на основе ТПП, локализованного на границе фотонного кристалла, сопряжённого с плёнкой германия и металлическим слоем. Схематическое изображение исследуемой структуры представлено на рис. 1.

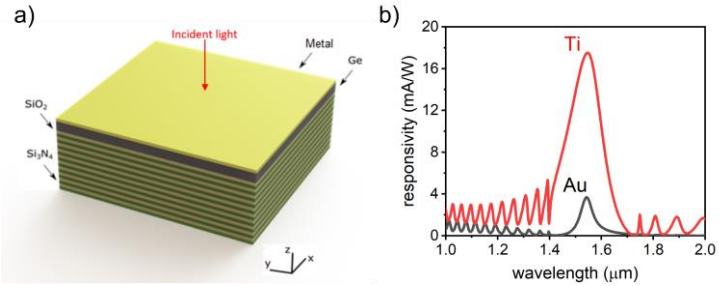


Рис. 1. Схематическое изображение исследуемой структуры: толщины слоёв SiO_2 и Si_3N_4 равны 140 нм и 120 нм, соответственно, толщина германиевой плёнки равна 50 нм, количество слоёв фотонного кристалла N = 10 (a); зависимость фоточувствительности устройства от длины волны света и материала металлической плёнки, толщина плёнки золота равна 15 нм, а титана – 7 нм (b)

Фоточувствительность предложенного устройства определяется как:

$$R(\omega) = q \cdot A(\omega) \cdot \eta / \hbar\omega, \quad \eta = \frac{(\hbar\omega - \Delta E_b)^2}{4 E_f \hbar\omega}, \qquad (1)$$

где q – элементарный заряд, $A(\omega)$ – поглощение на длине волны ТПП, $\hbar\omega$ – энергия фотона, ΔE_b – величина барьера Шоттки, E_f – энергия Ферми.

Из формулы (1) следует, что кроме коэффициента поглощения на резонансной длине волны, не маловажна и величина барьера Шотки, так как она вносит существенный вклад в квантовую эффективность устройства. Литературный обзор показал, что наименьшая величина барьера Шотки достигается при контакте германия с титаном (ΔE_b = 0.35 эВ), в то время как на границе с золотом величина барьера ΔE_b = 0.59 эВ. Сравнительные расчёты фоточувствительности устройства представлены на рис. 1b. Замена золотой плёнки на титановую обеспечивает увеличение фоточувствительности в 4,5 раза, с 4 до 18 мА/Вт. Данное исследование показывает, что наибольшая фоточувствительность обеспечивается при сопряжении ФК с плёнками германия и титана.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 24-22-00181.

Список литературы

1. Kaliteevski M., et al. // Phys. Rev. B. 2007. V. 76. P. 165415.
2. Xu W.-H., et al. // Adv. Phot. Res. 2021. V. 3. P. 2100120.
3. Chen Y.-S., et al. // Adv. Phot. Res. 2023. V. 3. P. 2200094.
4. Huang C.-H., et al. // Nanomaterials. 2023. V. 13. P. 693,

УДК 535(06)+004(06)

А.А. ЛЕОНИДОВА, Д.С. ПРОКУРАТОВ[1], Д.В. МАРАСАНОВ, Н.В. НИКОНОРОВ

Университет ИТМО, Санкт-Петербург
[1]Отдел научно-технологической экспертизы Государственного Эрмитажа, Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОФИЛЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЕРЕБРА В ИОНООБМЕННОМ ВОЛНОВОДЕ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНО-ИСКРОВОЙ ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Приведены результаты количественного анализа ионообменных волноводов методом лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии (ЛИЭС). Показано отличие в кривых распределения Ag и Na в глубину образцов в зависимости от толщины ионообменного слоя и режима термообработки.

A.A. LEONIDOVA, D.S. PROKURATOV[1], D.V. MARASANOV, N.V. NIKONOROV

ITMO University, Saint-Petersburg
[1]Examination and Authentication of Works of Art Department of the State Hermitage Museum, Saint-Petersburg

STUDY OF THE SILVER DISTRIBUTION PROFILE IN AN ION EXCHANGE WAVEGUIDE BY LASER INDUCED BREAKDOWN SPECTROSCOPY

The results of a quantitative analysis of ion-exchange waveguides using laser induced breakdown spectroscopy (LIBS) are presented. The difference in the distribution curves of Ag and Na in depth of the samples is shown depending on the thickness of the ion-exchange layer and the heat treatment mode.

Интегрально-оптические устройства широко применяются в оптической связи и для обработки оптической информации. Основным применением пассивных волноводов является деление оптических сигналов и переключение сигнала по разным каналам. Ионообменные волноводы получили широкое распространение, поскольку сочетают в себе несколько достоинств: возможность создавать широкий набор волноводов за счёт подбора параметров синтеза, возможность серийного производства устройств и эффективного согласования параметров планарных волноводов с волокнами для обеспечения минимальных потерь на соединении. При ионном обмене стекло помещается в расплав

соли и происходит замещение ионов в стекле (обычно Na^+) на ионы большего размера с более высокой поляризуемостью, например, Ag^+. В результате за счёт локального увеличения показателя преломления в приповерхностном слое стекла формируется волновод. Обычно профиль показателя преломления таких волноводов представляет собой экспоненту, убывающую от поверхности стекла в глубину. Часто волновод заглубляют, то есть проводят обратный обмен Ag^+ на Na^+, для того чтобы исключить влияние поверхности на характеристики волновода. Для контроля профиля распределения серебра используются различные методы, например, интерференционный, рентгенофлуоресцентный микроанализ и метод резонансного возбуждения волноводных мод. Все эти методы имеют свои ограничения, так для построения профиля показателя преломления интерференционным методом требуется изготавливать тонкие образцы (около 100 мкм), при рентгенофлуоресцентном анализе необходимо делать микрошлиф, а при методе резонансного возбуждения волноводных мод часто технически сложно возбудить волноводные моды (например, в случае заглублённых волноводов). Метод лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии основан на лазерной абляции поверхности материала с получением ионизированной плазмы. Часть плазмы собирается в спектрометр, который разлагает свет, испускаемый возбуждёнными атомами и ионами, на длины волн. Многократным воздействием лазерного излучения в одну точку поверхности можно сформировать кратер с контролируемой глубиной и при каждом импульсе анализировать химический состав, используя эмиссионные спектры образующейся лазерной плазмы.

В данной работе были исследованы профили серебряных ионообменных волноводов с различным временем ионного обмена. Для верификации метода ЛИЭС были проведены дополнительные исследования рентгенофлуоресцентным микроанализом и методом резонансного возбуждения волноводных мод. Показано, что метод ЛИЭС позволяет производить построение стратиграфического распределения ионов Ag^+ и Na^+ по глубине, а также определять количественные значения исследуемых элементов.

УДК 535(06)+004(06)

К.Д. ЛЯХОМСКАЯ
Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко, Тирасполь

ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ СВЯЗИ СВЕТОВОДОВ И КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ НА ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ В БЕСКОНЕЧНОМ МАССИВЕ СВЕТОВОДОВ

Изучены особенности распространения лазерного излучения в массиве из двух бесконечных цепочек световодов с линейно меняющейся постоянной распространения и наличием усиления (поглощения) света. Показано влияние коэффициентов связи световодов и коэффициента усиления на характер поведения пространственных профилей интенсивности распространяющегося излучения и смену периодического и апериодического режимов.

K.D. LIAKHOMSKAIA
Transnistrian State University named after T.G. Shevchenko, Tiraspol

INFLUENCE OF THE COUPLING COEFFICIENTS OF LIGHT GUIDES AND THE GAIN COEFFICIENT ON THE PECULIARITIES OF RADIATION PROPAGATION IN AN INFINITE ARRAY OF LIGHT GUIDES

The peculiarities of laser radiation propagation in an array of two infinite chains of light guides with a linearly changing constant propagation and the presence of light amplification (absorption) have been studied. The influence of the coupling coefficients of light guides and the gain coefficient on the behavior of spatial profiles of the intensity of propagating radiation and the change of periodic and aperiodic regimes is shown.

Стремительно развивающаяся неэрмитова топологическая фотоника [1, 2] одной из своих задач рассматривает создание принципиально новых оптических систем, которые позволяют управлять локализацией распространяющегося в них излучения с помощью характеристик систем – различных периодических структур, в частности, фотонных решёток, в том числе в виде систем световодов с PT-симметрией. Простейшим примером PT-симметричной волноводной системы является система из двух световодов, один из которых характеризуется усилением распространяющегося излучения, другой – потерями. Особые точки и таких систем изучены в [3] на примере связанных волноводных решёток со сбалансированными усилением и потерями. Показано, что поведение

излучения становится чрезвычайно чувствительным к малым изменениям начальных условий или параметров системы.

В данной работе получены аналитические решения системы дифференциальных уравнений для амплитуд полей распространяющихся волн в PT-симметричном массиве из двух бесконечных цепочек световодов (рис. 1), характеризующихся линейным законом изменения постоянной распространения и наличием усиления (поглощения) распространяющегося излучения.

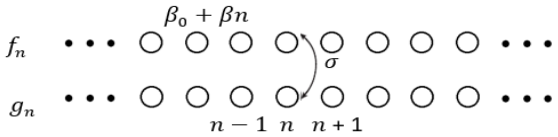


Рис. 1. Схема задачи

Показано, что значение коэффициента связи σ между световодами одного номера, но разных цепочек массива обуславливает компенсацию механизма экспоненциального усиления распространяющегося излучения и позволяет управлять выбором режима распространения пространственных профилей интенсивностей распространяющегося излучения (рис. 2).

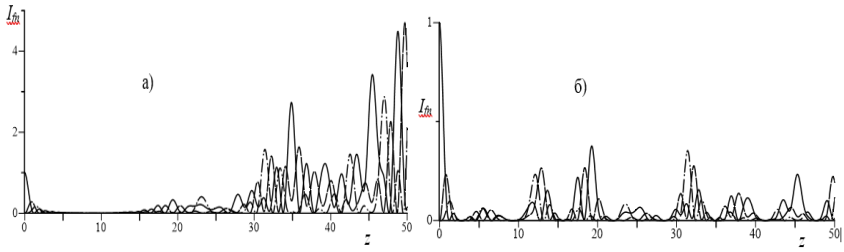


Рис. 2. Пространственные профили интенсивности при: σ = 0.1 (а) и σ = 0.5 (б) в n = 0 ($I_0(z)$ – сплошная), в n = 1 ($I_1(z)$ – пунктир) и n = 2 ($I_2(z)$ – точка-пунктир) световодах f цепочки массива

Список литературы

1. Lu L., Joannopoulos J.D., Soljac˘icr M. // arXiv:1408.6730 v2 [physics.optics]. 2014.
2. Bender C.M., Boettcher S. // Phys. Rev. Lett. 1998. V. 80. P. 243.
3. Longhi S. // Optics Letters. 2018. V. 43. No. 12.

Д.А. ГУРЬЕВ[1], Н.Э. НИКОЛАЕВ, А.В. ПУСТОВАЛОВ[2],
А.Р. РАВИН, В.Б. ЦВЕТКОВ[1], Т.К. ЧЕХЛОВА
Российский университет дружбы народов, Москва
[1]Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва
[2]МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ГРАДИЕНТНЫХ ВОЛНОВОДОВ НА ОСНОВЕ АКТИВНОГО СТЕКЛА

Приведены результаты решения задачи расчёта параметров волноводного слоя и полей волноводных мод. На основании экспериментально измеренных зависимостей коэффициента замедления от времени диффузии, выбрана математическая модель и проведён расчёт распределения показателя преломления в волноводном слое.

D.A. GURIEV[1], N.E. NIKOLAEV, A.V. PUSTOVALOV[2], A.R. RAVIN,
V.B. TSVETKOV[1], T.K. CHEKHLOVA
Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow
[1]Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow
[2]MIREA – Russian Technology University, Moscow

STUDY OF OPTICAL GRADIENT WAVEGUIDES BASED ON ACTIVE GLASS

The results of solving the problem of calculating the parameters of the waveguide layer and the fields of waveguide modes are presented. Based on the experimentally measured dependences of the effective index on the diffusion time, a mathematical model was chosen and the distribution of the refractive index in the waveguide layer was calculated.

Градиентные оптические волноводы находят широкое применение в устройствах фотоники, таких как модуляторы, переключатели, волноводные лазеры и другие устройства. К их достоинствам следует отнести низкие потери, простоту стыковки с оптическим волокном, а в случае волноводных лазеров и локализация поля в активной среде при одномодовом режиме распространения [1].

Экспериментальные образцы волноводов были изготовлены методом твердотельной диффузии оксида свинца в силикатном лазерном стекле ГЛС-6.

Для исследования параметров волноводного слоя и проведения расчётов полей волноводных мод была решена обратная задача определения параметров волновода на основе измеренных коэффициентов замедления. Решение этой задачи производилось в вариационной постановке.

Возможны два варианта постановки задачи расчёта распределения показателя преломления в волноводном слое. В первом случае волновод поддерживает большое число мод, достаточное для определения параметров модельного распределения показателя преломления. Во втором случае волновод поддерживает одну–две моды и измерения коэффициентов замедления проводятся при различных временах диффузии. Выбор соответствующей математической модели диффузионного процесса позволяет определить параметры модельного распределения показателя преломления. Адекватность выбранной модели экспериментальным данным проверяется по отклонениям расчётных и измеренных коэффициентов замедления.

Непосредственно минимизация целевой функции может осуществляться с использованием типовых методов, например, встроенных в выбранную систему математического моделирования. [2, 3].

Список литературы

1. Jia Y., Chen F. Compact solid-state waveguide lasers operating in the pulsed regime: a review // Chin. Opt. Lett. 2019. V. 17 (1). P. 012302.

2. Hertel P., Menzler H.P. Improved inverse WKB procedure to reconstruct refractive index profiles of dielectric planar waveguides // Appl. Phys. B. 1987. V. 44. P. 75-80.

3. Chiang K.S., Chi L.W. Refractive-index profiling of single-mode graded-index optical planar waveguides by the inverse Wentzel-Kramers-Brillouin method with improved accuracy // Optical Engineering. 2005. V. 44 (5). P. 054601.

УДК 535(06)+004(06)

С.Ю. ОТРОХОВ
Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

ПЕРЕХОДНЫЕ ЗОНЫ ДЛЯ ВЫТЕКАЮЩИХ МОД В ПЛАНАРНЫХ W-СВЕТОВОДАХ

На основе численного решения дисперсионного уравнения исследованы переходные зоны для вытекающих мод на границах одномодового и двухмодового режимов планарных W-световодах. Показано, что размеры рассмотренных переходных зон на частотах отсечки основной, первой нечётной и второй чётной мод существенно зависят от геометрических и оптических параметров W-световодов. Указанные обстоятельства важно учитывать при подборе параметров W-световодов с тем, чтобы обеспечить в них устойчивый одномодовый или многомодовый режим, необходимую концентрацию поля и эффективную фильтрацию вытекающих мод.

S.Yu. OTROKHOV
Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS

TRANSITION REGIONS FOR LEAKY MODES IN PLANAR W OPTICAL FIBERS

Based on the numerical solution of the dispersion equation, the transition regions at the interfaces of single- and dual-mode regimes have been investigated for leaky modes of planar W optical fibers. It is shown that the sizes of the transition regions under consideration at the cutoff frequencies of the fundamental, first odd, and second even modes depend strongly on the geometric and optical parameters of W optical fibers. These circumstances should be taken into account when choosing parameters of W optical fibers in order to ensure in them a stable single-mode or multimode regime, necessary field concentration, and efficient filtering of leaky modes.

W-световоды по ряду характеристик намного эффективнее, чем стандартные световоды со ступенчаты показателем преломления. В таких световодах можно обеспечить одномодовый режим при большом сечении фундаментальной моды и малых оптических потерях излучения на изгибе [1, 2]. Однако переходные зоны [3] от одного режима излучения к другому, например, от одномодового к двухмодовому в зависимости от параметров волновода пока мало исследованы. Световедущая структура плоского W-световода зависит от пяти параметров: трёх значений

показателей преломления, n_1, n_2, n_3 ($n_1 > n_3 > n_2$) и величин a и b, определяющих ширину слоёв волновода (рис. 1).

Целью работы является определение границ переходной зоны в W-световодах; а именно переходной зоны для вытекающих мод из режима вытекающих мод к одномодовому режиму на частоте отсечки основной моды, от одномодового режима к двухмодовому на частоте отсечки первой нечётной моды и т.д. при всех допустимых значениях коэффициента преломления промежуточного слоя n_2 ($1 \le n_2 \le n_3$).

Для численного расчёта и построения графиков использованы результаты, полученные в работе [3]. Для наглядности представления результатов расчётов рассмотрен W-световод с редуцированным промежуточным слоем ($n_1 = 1.456$, $n_3 = 1.453$, a = 9.93 мкм, b = 10 мкм). Вид получаемых зависимостей имеет общий характер для любых плоских W-световодов (рис. 2 и 3).

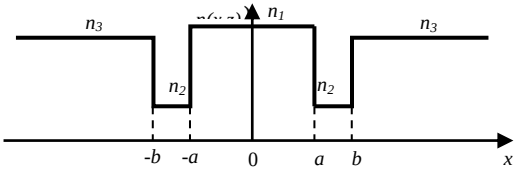


Рис. 1. Схема поперечного распределения показателя преломления в плоской пятислойной световедущей структуре

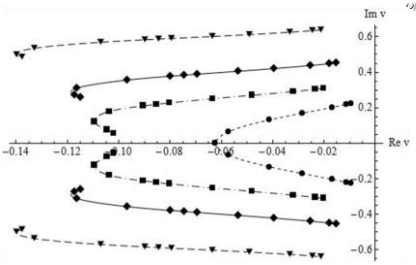


Рис. 2. Зависимость внешних поперечных волновых чисел вытекающих мод (трёх наименьших по модулю) на длине волны λ = 1.55μm (1●),(2▼),(4◆) и одного на λ = 2μm (3■) от значений n_2 = 1 (1), 1.36 (7), 1.453 (12)

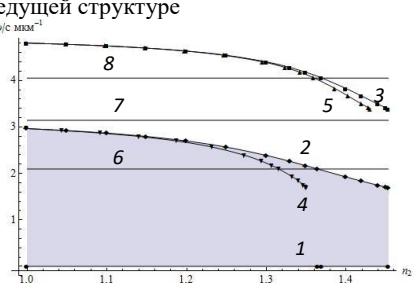


Рис. 3. Частоты отсечки основной (1), первой нечётной (2) и второй чётной (3) мод W-световода, а также нижние границы переходных зон (кривые 4 и 5) в зависимости от n_2 ($1 \le n_2 \le n_3$)

Список литературы

1. Wadsworh W.J., et al. // IEEE Photonics Technology Lett. 2004. V. 16. No. 3. P. 843-845.
2. Отрохов С.Ю. и др. // Радиотехника и электроника. 2010. Т. 55. № 10. С. 1185-1192.
3. Отрохов С.Ю. и др. // Оптический журнал. 2014. Т. 81. № 8. С. 59-65.

УДК 535(06)+004(06)

Д.А. КОРНИЛИН, Р.С. ПОНОМАРЕВ, В.А. ДЕМИН
Пермский государственный национальный исследовательский университет

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ БУФЕРНОГО СЛОЯ НА ФОРМУ ЛИНЗОВАННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

Приведены результаты экспериментов по изучению влияния толщины буферного слоя при формировании линз на конце оптического одномодового волокна на форму конуса линзованных оптических волокон. Определена зависимость формы конуса от толщины буферного слоя при заданных параметрах.

D.A. KORNILIN, R.S. PONOMAREV, V.A. DEMIN
Perm National Research State University

INFLUENCE OF BUFFER LAYER THICKNESS ON THE SHAPE OF LENSED OPTICAL FIBERS

The results of experiments are presented to research the influence of the thickness of the buffer layer during the formation of lenses at the end of a single-mode optical fiber on the shape of the lensed optical fibers cone. The dependence of the cone shape on the thickness of the buffer layer at given parameters was determined.

Линзованные оптические волокна довольно широко применяются в интегральной оптике [1 - 3]. Использование таких волокон позволяет сфокусировать излучение в пятно размером порядка 1 - 2 мкм, что даёт возможность проводить стыковку оптического волокна и интегральной схемы через воздушную среду без использования оптического клея в области распространения света [4]. Одним из наиболее распространённых методов производства линзованных волокон является объёмное травление, при котором весь процесс протекает в объёме водного раствора плавиковой кислоты на границе раздела с газовой фазой или несмешивающимся с раствором верхним реагентом (буферным слоем). Такой метод производства позволяет добиться потерь на стыке около 3 дБ [5, 6]. Варьируя геометрические параметры линзованных оптических волокон, можно значительно расширить область их применения, так как при таком изменении также меняются параметры светового пучка [7].

Целью работы является проверка влияния толщины буферного слоя при травлении линзованных оптических волокон на их геометрические параметры. В качестве травителя используется 60 % раствор плавиковой

кислоты, а в качестве буферного слоя – ксилол. Травление производилось на одномодовом кварцевом волокне.

В результате травления на торце формируются конусы (рис. 1), длина которых зависит толщины буферного слоя (рис. 2), а именно увеличивается при увеличении толщины этого слоя до определенного значения, после чего остается на постоянном уровне вне зависимости от количества добавленного растворителя.

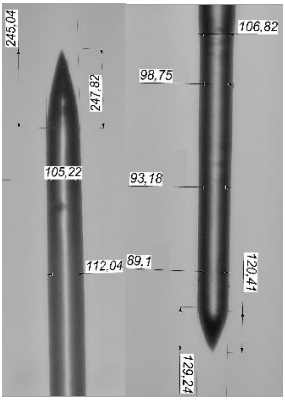


Рис. 1. Линзованные оптические волокна, полученные методом химического травления

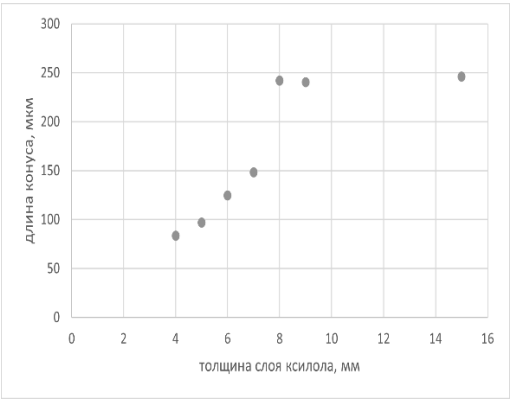


Рис. 2. Зависимость длины конуса линзованных волокон от толщины буферного слоя

Список литературы

1. Grattan K.T.V., Sun T. Fiber optic sensor technology: An overview // Sens Actuators A Phys. 2000. V. 82, No. 1.

2. Udd E. Overview of fiber optic sensors. Fiber Optic Sensors, Second Edition. 2017.

3. Koshelev A., et al. High refractive index Fresnel lens on a fiber fabricated by nanoimprint lithography for immersion applications // Opt Lett. 2016. V. 41. No. 15.

4. Pawar D., Kale S.N. Correction to: A review on nanomaterial-modified optical fiber sensors for gases, vapors and ions // Microchimica Acta. 2019. V. 186. No. 5.

5. Eisenstein G., Vitello D. Chemically Etched Conical Microlenses for Coupling Single Mode Lasers into Single Mode Fibers. 2023.

6. Minh P.N., et al. Bach fabrication of microlens at the end of optical fiber using self-photolithgraphy and etching techniques // Opt Rev. 2003. V. 10. No. 3.

7. Кучмижак А.А. и др. Технология создания волоконных микроаксиконов для фокусировки лазерного излучения и генерации Бесселевых пучков // Вестник ДВО РАН. 2014. Т. 6.

УДК 535(06)+004(06)

М.Д. МИРУЩЕНКО, К.Д. КОСОЛАПОВА, С.А. ЧЕРЕВКОВ,
М.А. САНДЖИЕВА, Е.В. УШАКОВА
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИЕ ДИОДЫ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ ТОЧЕК ИЗ БЕНЗОЙНОЙ И ЛИМОННОЙ КИСЛОТ

Представлены результаты исследований по синтезу углеродных точек из бензойной и лимонной кислот и их использованию в светодиодах. Определены оптимальные соотношения компонентов для получения углеродных точек, обладающих наилучшими свойствами. Углеродные точки были внедрены в структуру светодиодов в качестве светоизлучающего материала, максимальная яркость которых достигает 2700 кд/м². Результаты этой работы открывают путь к разработке простых, безопасных и ярких светодиодов с использованием углеродных точек.

M.D. MIRUSCHENKO, K.D. KOSOLAPOVA,
S.A. CHEREVKOV, M.A. SANDZHIEVA, E.V. USHAKOVA
ITMO University, Saint-Petersburg

LIGHT-EMITTING DIODES BASED ON CARBON DOTS DERIVED FROM BENZOIC AND CITRIC ACIDS

The research presents findings on the synthesis of carbon dots from benzoic and citric acid and their application in LEDs. Optimal component ratios were determined to produce carbon dots with superior properties. These carbon dots were incorporated into the LED structure as the light-emitting material, achieving a maximum brightness of 2700 cd/m². The outcomes of this study pave the way for the development of simple, safe, and bright LEDs utilizing carbon dots.

Углеродные точки (УТ) представляют собой наночастицы размером менее 10 нм, состоящие из различных аллотропных модификаций углерода, обладающие уникальными характеристиками, такими как высокая фотостабильность, химическая инертность, поглощение и излучение света в оптическом диапазоне и лёгкая внедряемость в различные полимерные матрицы [1]. Оптические свойства УТ могут значительно изменяться при варьировании их состава и условий синтеза. Благодаря своим свойствам УТ могут стать отличной основой для создания светоизлучающих диодов.

Целью работы является создание светодиодов со светоизлучающим слоем на основе УТ из бензойной и лимонной кислот. УТ были внедрены в проводящий полимер поливинилкарбазол (PVK). Полученный композит использован для создания светодиода с гетероструктурой ITO/PEDOT:PSS/PolyTPD/EmL/TPBi/LiF/Al, где EmL – излучающий слой из PVK и УТ. Для полученных светодиодов были измерены вольтамперные и вольт-яркостные характеристики, получены спектры электролюминесценции. Было показано, что именно УТ являются основным светоизлучающим компонентом в светодиодах. Максимальная яркость полученных устройств достигла 2700 кд/м^2, а сами светодиоды сохраняли способность к свечению спустя пятнадцать и более минут непрерывной работы. На рис. 1 представлен светодиод с фигурной излучающей частью в форме логотипа Университета ИТМО.

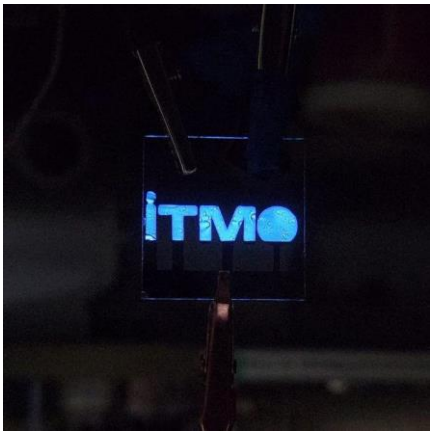


Рис. 1. Фотография светодиода на основе углеродных точек

Работа выполнена при финансовой поддержке программы «Приоритет 2030».

Список литературы

1. Stepanidenko E.A., Ushakova E.V., et al. // Applications of carbon dots in optoelectronics. 2021. V. 11 (2). P. 364.

М.М. ВЕКШИН, Н.А. ЯКОВЕНКО
Кубанский государственный университет, Краснодар

РАЗРАБОТКА ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКОГО ТРЁХКАНАЛЬНОГО МОДОВОГО МУЛЬТИПЛЕКСОРА НА ОСНОВЕ ИОНООБМЕННЫХ ВОЛНОВОДОВ В СТЕКЛЕ

Разработан интегрально-оптический трёхканальный мультиплексор волноводных мод TE_0, TE_1 и TE_2 на основе асимметричных Y-разветвителей. Разработка проведена для технологии формирования оптических волноводов методом ионного обмена в стекле.

M.M. VEKSHIN, N.A. YAKOVENKO
Kuban State University, Krasnodar

DESIGN OF INTEGRATED-OPTIC 3-CHANNEL MODE MULTIPLEXER BASED ON ION-EXCHANGE WAVEGUIDES IN GLASS

The integrated-optic 3-channel multiplexer for TE_0-, $TE1_1$- and TE_2-modes, based on asymmetric Y-couplers, has been designed. The multiplexer design has been made for optical waveguide fabrication technology by ion exchange in glass.

Большую актуальность в настоящее время представляют исследования новых методов уплотнения каналов для ВОЛС [1]. Цель работы состоит в разработке интегрально-оптического модового мультиплексора (демультиплексора) мод TE_0, TE_1 и TE_2 на основе Y-разветвителей в стекле. На рис.1 представлена схема модового мультиплексора.

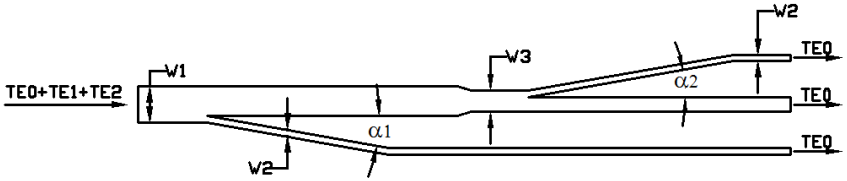
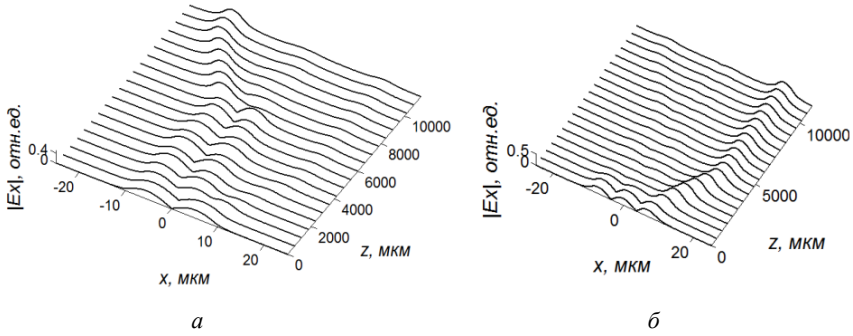


Рис. 1. Схематический вид волноводной структуры интегрально-оптического модового мультиплексора на основе Y-разветвителй

Принцип работы схемы основан на работе асимметричных Y-разветвителей в режиме селекции мод. Для создания модового мультиплексора использована технология изготовления элементов интегральной оптики методом ионного обмена $K^+ \leftrightarrow Na^+$ в стекле К-8. Путём комбинированного решения уравнения для термического ионного обмена и волнового уравнения, определяющих оптические характеристики мод волноводов Y-разветвителей, установлены параметры, необходимые для изготовления мультиплексора, функционирующего на рабочей длине волны 0.85 мкм.

Параметры w_1, w_2 и w_3 на схеме обозначают размеры щели в маске для изготовления волноводов, их расчётные значения составляют 12, 2 и 6,8 мкм соответственно. Общая длина схемы составляет 11 мм.

На рис. 2 показаны картины распространения моды TE_1 и моды TE_2 в мультиплексоре. Расчёт выполнен методом распространяющегося пучка.



а *б*

Рис. 2. Картина распространения мод TE_1 (*а*) и TE_2 (*б*) в модовом мультиплексоре

Как видно из графиков, волноводная структура выполняет функцию демультиплексора. Моды TE_1 и TE_2 разделяются по различным выходным каналам, при этом они трансформируются в моду TE_0. Входная мода TE_0 выделяется в центральный выходной канал. Согласно расчётным данным вносимые потери составляют 0,3 дБ (без учёта технологических потерь при изготовлении волноводов схемы и потерь на стыковку с волоконными световодами на входе и выходе схемы), коэффициент изоляции составляет 20 дБ.

Список литературы

1. Du J., Shen W., et. al. // Chinese Optics Letters. 2021. V. 19 (9). P. 091301.

УДК 535(06)+004(06)

И.В. БОГАЧКОВ, Н.И. ГОРЛОВ[1]
Омский Государственный технический университет, Омск
[1]Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Новосибирск

РАСПРЕДЕЛЁННОЕ ВОЛОКОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ РЭЛЕЯ

В данной работе проанализированы процессы рассеяния Рэлея и принципы построения оптических рефлектометров. Приведены зависимости основных характеристик волоконного зондирования от параметров аппаратуры и оптического волокна.

I.V. BOGACHKOV, N.I. GORLOV[1]
Omsk State Technical University, Omsk
[1]Siberian State University of Telecommunications and Informatics, Novosibirsk

DISTRIBUTED FIBER SENSING BASED ON RAYLEIGH BACKSCATTERING

The report analyzes Rayleigh scattering processes and the principles of construction of optical reflectometers. The dependences of the main characteristics of fiber sensing on the parameters of the equipment and optical fiber are given.

Рэлеевское рассеяние обусловлено рассеянием света от частиц или других источников с флуктуациями показателя преломления, значительно меньшими, чем оптическая длина волны. Интенсивность рассеяния сильно зависит от длины падающей волны и пропорциональна $1/\lambda$ [1], где λ – длина волны распространяющегося оптического сигнала. Такая зависимость от длины волны приводит к увеличению рассеяния для сигналов с меньшей длиной волны и, соответственно, к большим потерям для коротких длин волн [2]. Рассеянный в прямом направлении рэлеевский свет передаётся вместе с падающим светом накачки, а рэлеевский рассеянный в обратном направлении свет является основой для работы оптической рефлектометрии во временной области.

Оптическая рефлектометрия во временной области используется в основном как простой метод для контроля работоспособности оптического канала связи . В этом методе короткий мощный световой импульс подаётся в тестируемое оптоволокно (ОВ), а рэлеевский сигнал, рассеянный обратно, регистрируется как функция времени возврата на

входном конце волокна в соответствии с конфигурацией, показанной на рис. 1.

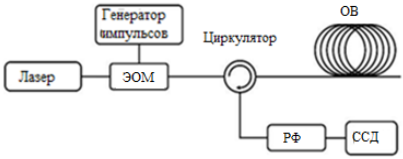


Рис. 1. Стандартная конфигурация оптического рефлектометра

Расстояние вдоль волокна может быть рассчитано по следующей формуле [3]

$$z = \frac{c}{2n}t = \frac{v_g}{2}t,$$

где t – время обнаружения обратного рассеяния, v_g – групповая скорость в волокне, а коэффициент 2 означает, что входной импульс проходит по волокну и обратный импульс проходит тот же путь на обратном пути к детектору. Доля мощности обратного рэлеевского рассеяния, которая может вернуться на входной конец, исходящий из точки x, будет зависеть от различных факторов, описанных ниже [3],

$$P(z)_{BS} = \frac{v_s \tau}{2}\eta\alpha_s(z)P_0 \exp\left[-2\int_0^z a(x)dx\right],$$

где P_0 – входная оптическая мощность, $\alpha_s(z)$ – коэффициент ослабления за счёт рэлеевского рассеяния, $\alpha(x)$ – общий коэффициент ослабления, представляющий собой комбинацию ослабления за счёт потерь на поглощение и рэлеевского рассеяния, H – эффективность сбора рассеянного света, улавливаемого волокном, которая зависит от свойств волокна, таких как профиль показателя преломления, диаметр модового поля и числовая апертура.

Список литературы

1. Agrawal G.P. Nonlinear fiber optics. USA: Academic Press, 2013.

2. Shimada S. Coherent lightwave communications technology. Springer science & Business media, 2012.

3. Palmieri L., Schenato L. Distributed optical fiber sensing based on Rayleigh Scattering // The Open Optics Journal. 2013. V. 7 (1).

УДК 535(06)+004(06)

Д.В. БОЛОТОВ, О.В. КОЛЕСНИКОВ, С.Ю. КАЗАНЦЕВ, М.И. ШУЛЬГА
Московский технический университет связи и информатики «МТУСИ»

О СТАБИЛЬНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМ КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКУЮ ТРАССУ

Приведён результат эксперимента, направленных на изучение стабильности промышленной системы квантового распределения ключа при воздействии внешнего магнитного поля на тракт передачи. Определено что испытуемая система остаётся стабильной при воздействии на тракт внешнего поля.

D.V. BOLOTOV, O.V. KOLESNIKOV, S.Yu. KAZANTSEV, M.I. SHULGA
Moscow Technical University of Communications and Informatics

ON THE STABILITY OF INDUSTRIAL QUANTUM KEY DISTRIBUTION SYSTEM UNDER THE INFLUENCE OF AN EXTERNAL MAGNETIC FIELD ON THE FIBER OPTIC TRACK

The result of experiment aimed at studying the stability of an industrial quantum key distribution system under the influence of an external magnetic field on the transmission path is presented. It was determined that the system under test remains stable when test track is exposed to an external field.

Системы квантового распределения ключей (КРК) являются наиболее перспективным методом передачи ключей шифрования, однако физические принципы, являющиеся гарантом безопасности передаваемого шифра, также являются некоторым изъяном ограничивающим, на сегодняшний день, их дальность [1]. Целью данной работы является изучение стабильности промышленной системы квантового распределения ключа. Была проведена серия испытаний с целью получения данных для последующей оценки степени влияния магнитной составляющей электромагнитного поля на возможность передачи ключа по трассе подверженного влиянию.

Для выполнения поставленной задачи был собран испытательный стенд. К катушке (К) содержащей 15 км оптического волокна подключены блоки однопроходной системы КРК QKD312 (А и Б). Длина трассы составила 15 км с затуханием 4.25 дБ. Сквозь катушку, перпендикулярно направлению намотки оптического волокна пропущен медный кабель. Подаваемый на кабель генератором (Г) ток имел силу 150 А. Для контроля параметров системы блоки КРК были подключены к роутеру (Р) и компьютеру. В результате воздействия наблюдается незначительное увеличение среднего QBER. Ранее был проведён похожий эксперимент с использованием академических установок [3], результат коррелирует с приведённым в данной статье. График одного из образцов набора данных приведён на рис. 1, чёрным изображено изменение до начала воздействия, а серым – после начала воздействия. В ходе анализа выявлено что разница между средними значениями QBER до и после начала воздействия равна 0.2174 %, при среднем QBER во время внешнего воздействия всегда больше среднего QBER когда воздействие отсутствовало. При этом диапазон изменения QBER во время воздействия увеличился на 0.8633 %. Частотный анализ показал увеличение количества отсчётов с QBER выше среднего значения в наборе данных на 3.52 %. Также стоит отметить увеличение количества резких перепадов (1 % и более между отсчётами) значений QBER при воздействии поля на тракт передачи.

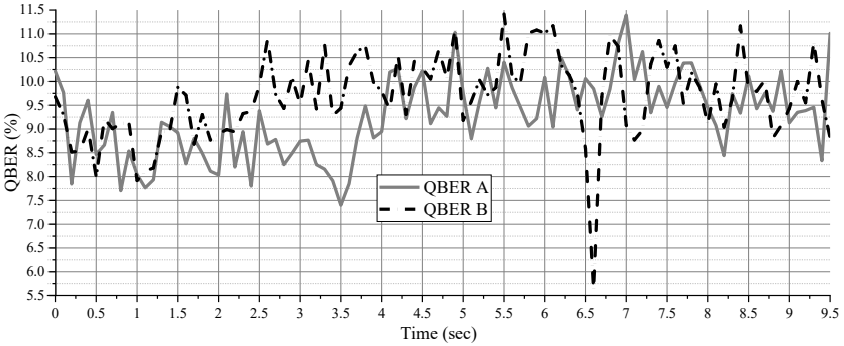


Рис. 1. График зависимости QBER от времени

Список литературы

1. Martin V., et al. // EPJ Quantum Technology. 2021. V. 8. P. 19-50.

2. Горбатов Д.В., Дорожкин А.Н., Игуменов А.Ю. и др. // Квантовая электроника. 2022. Т. 52. № 10. С. 923-928.

3. Kazieva T.V., Bolotov D.V., Kolesnikov O.V., et al. // 2023 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). 2023. P. 1-4.

УДК 535(06)+004(06)

ГАРКУШИН А.А.[1,2], СТОРОЖЕВ С.А.[1,2], УРБАНОВИЧ Е.В.[1],
ВОЛЬХИН И.Л.[2,3], НИФОНТОВА Е.В.[1,2], КРИШТОП В.В.[1,2,3]
[1]Пермский национальный исследовательский политехнический университет
[2]Пермская научно-производственная приборостроительная компания
[3]Пермский государственный национальный исследовательский университет

ПРИМЕНЕНИЕ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ В АЛГОРИТМЕ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ В СИСТЕМЕ POWER-OVER-FIBER

Предложено применение ШИМ в системе PoF с целью повышения КПД на интервале повышенных сопротивлений. Представлены результаты эксперимента при различных характеристиках фильтра. Определена зависимость работы алгоритма поиска оптимальной оптической мощности от характеристик фильтра.

GARKUSHIN A.A.[1,2], STOROZHEV S.A.[1,2], URBANOVICH E.V.[1],
VOLKHIN I.L.[2,3], NIFONTOVA E.V.[1,2], KRISHTOP V.V.[1,2,3]
[1]Perm National Research Polytechnic University
[2]Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company
[3]Perm National Research State University

APPLICATION OF PULSE-WIDTH MODULATION IN THE ALGORITHM OF SEARCH FOR OPTIMAL OPTICAL POWER IN THE POWER-OVER-FIBER SYSTEM

The application of PWM in the PoF system is proposed in order to increase the efficiency at the interval of increased impedances. Experimental results at different filter characteristics are presented. The dependence of the performance of the algorithm for searching the optimum optical power on the filter characteristics is determined.

Технология передачи оптической мощности, известная также как Power-over-Fiber (PoF), является инновационным подходом к передаче энергии по оптоволоконным линиям связи [1]. Применение существующего алгоритма [2] позволяет найти оптимальную оптическую мощность для различных значений сопротивления (рис. 1). При значениях оптической мощности до 15 Вт максимальное значение КПД системы PoF принимает низкие значения. Предлагается применение широтно-импульсной модуляции (ШИМ) для управления мощностью ЛДМ на интервале повышенных сопротивлений с целью увеличения КПД. Для сглаживания ШИМ сигнала мощности, которая поступает к потребителю,

используется емкость. На рис. 2 приведены результаты моделирования в MATLAB [3] с разным значением емкости при одном и том же значении сопротивления (200 Ом).

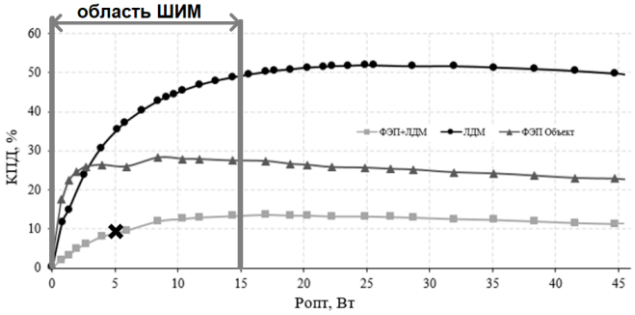
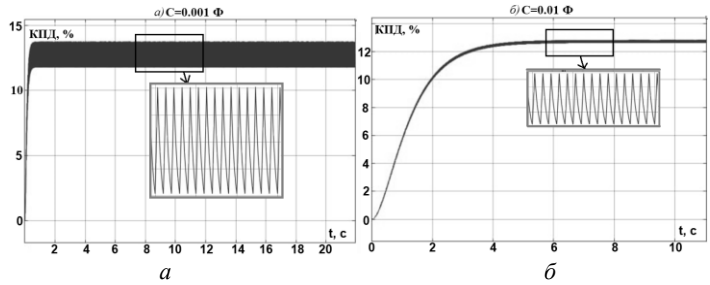


Рис. 1. Зависимость КПД компонентов PoF от оптической мощности: ФЭП объект, ЛДМ и ФЭП+ЛДМ, **X** – значение, используемое для оценки работы ШИМ – 5 Вт (200 Ом)



а *б*

Рис. 2. Графики изменения КПД в зависимости от времени: при ёмкости равной 0.001 Ф (*а*), при ёмкости равной 0.01 Ф (*б*)

Результаты моделирования, представленные на рис. 2, показывают, что время нахождения оптимальной мощности и разброс КПД зависят от значения ёмкости.

Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2023-0005).

Список литературы

1. Гаркушин А.А. и др. // Прикладная фотоника. 2023. Т. 10. № 1. С. 46-67.

2. Мухамбедьяров Б.Б. и др. // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 6. С. 1099-1107.

3. Garkushin A.A., et al. // Journal of Physics: Conference Series, 2023.

И.В. БОГАЧКОВ
Омский государственный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ МАНДЕЛЬШТАМА–БРИЛЛЮЭНА В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ, ЛЕГИРОВАННЫХ ИОНАМИ ЭРБИЯ

В работе представлены результаты экспериментальных исследований характеристик рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в оптических волокнах, легированных ионами эрбия.

I.V. BOGACHKOV
Omsk State Technical University

RESEARCHES OF THE MANDELSTAM–BRILLOUIN SCATTER CHARACTERISTICS OF OPTICAL FIBERS DOPED WITH ERBIUM IONS

The results of experimental testing of the Mandelstam–Brillouin scatter characteristics of optical fibers doped with erbium ions are presented in this work.

В настоящее время существует значительное количество типов оптических волокон (ОВ), легированных ионами эрбия (EDF – erbium-doped fiber), которые используются в эрбиевых оптических усилителях [1 - 3]. С целью изучения характеристик рассеяния Мандельштама–Бриллюэна (РМБ) (спектра РМБ – СРМБ) и оценки величины бриллюэновского частотного сдвига (БЧС) в EDF разновидности «АЕ», предоставленного сотрудниками Пермского федерального исследовательского центра, были проведены экспериментальные исследования с бриллюэновским импульсным рефлектометром «Ando AQ 8603» при содействии ЗАО «Москабель-Фуджикура».

На рис. 1 представлено пространственное распределение СРМБ.

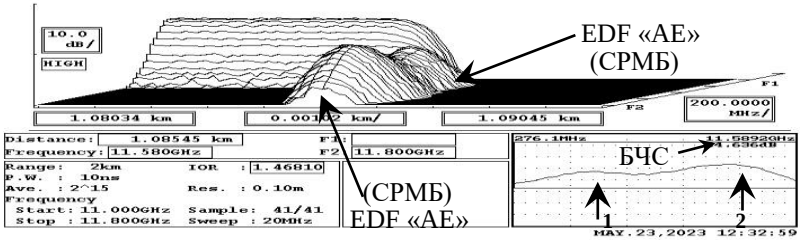


Рис. 1. Пространственное распределение СРМБ для ОВ EDF «АЕ»

На рис. 1 в правом нижнем углу показан профиль СРМБ и величина БЧС для EDF AE. На рис. 2 для ОВ EDF «AE» показана соответствующая мультирефлектограмма, которая представляет пространственные зависимости (по всей длине световода) натяжения (Strain), ширины СРМБ (B.S.W), профиля СРМБ) и уровня обратно отражённого сигнала (Loss), с указанием характерных участков и положения БЧС [1 - 3].

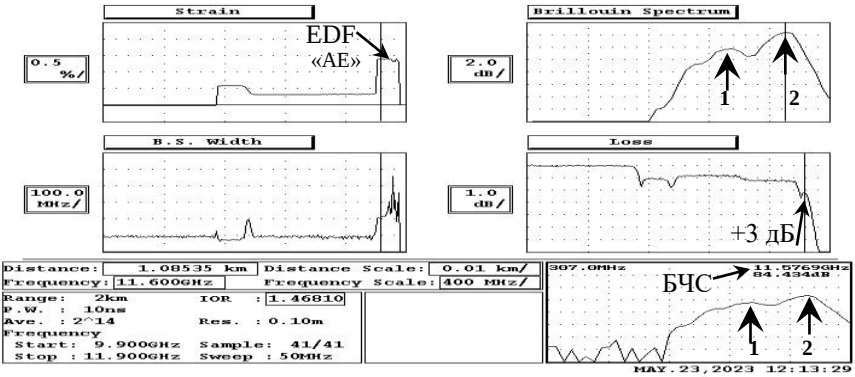


Рис. 2. Мультирефлектограмма для ОВ EDF «AE»

На графике уровня обратно отражённого сигнала хорошо заметен подъём («горб») примерно на 3 дБ в начале EDF, но для EDF длиной более 3 м после него наблюдается стремительное падение уровня сигнала. Такие эффекты у обычных ОВ не наблюдались. Величина БЧС для ОВ EDF AE при нормальных условиях (при комнатной температуре и отсутствии продольного натяжения) равна 11.59 ГГц (2-й максимум, «главный»; положение 1-го «пика» – 11.22 ГГц). То, что большим по уровню является 2-й, а не 1-й «пик», встречается достаточно редко. Ранее подобный эффект наблюдался лишь в ОВ со значительным содержанием фтора. При нагреве ОВ EDF AE до 70°C происходит смещение СРМБ в сторону увеличения частоты («главный» максимум (БЧС) обнаруживается на частоте 11.63 ГГц, а 1-й – на частоте 11.27 ГГц).

Список литературы

1. Bogachkov I.V., Gorlov N.I. The experimental testing of the Mandelstam–Brillouin backscatter parameters in some varieties of optic fibers // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, Dynamics 2022 Proceedings. 2022. P. 1-5.

2. Bogachkov I.V. The experimental researches of the Mandelstam–Brillouin scatter characteristics in erbium optical fibers of various kinds // T-comm, 2019. V. 13. No. 4. P. 70-75.

3. Bogachkov I.V. Researches of the Mandelstam–Brillouin backscatter spectrum in the erbium-doped optical fiber // T-comm, 2017. V. 11. No. 6. P. 59-63.

И.В. БОГАЧКОВ
Омский государственный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ МАНДЕЛЬШТАМА–БРИЛЛЮЭНА В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ, ЛЕГИРОВАННЫХ ИОНАМИ ЭРБИЯ И ЦЕРИЯ

В работе представлены результаты экспериментальных исследований характеристик рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в оптических волокнах, легированных ионами эрбия и церия.

I.V. BOGACHKOV
Omsk State Technical University

RESEARCHES OF THE MANDELSTAM–BRILLOUIN SCATTER CHARACTERISTICS OF OPTICAL FIBERS DOPED WITH ERBIUM AND CERIUM IONS

Results of experimental testing of the Mandelstam–Brillouin scatter characteristics of optical fibers doped with erbium and cerium ions are presented in this work.

Оптические волокна, легированных не только ионами эрбия, но и также ионами церия (EcDF – erbium and cerium doped fiber), имеют повышенную стойкость к радиации [1 - 3]. С целью изучения характеристик спектра рассеяния Мандельштама–Бриллюэна (СРМБ) и оценки величины бриллюэновского сдвига частоты (БЧС) в EcDF с малой концентрации церия, которое было предоставлено сотрудниками Пермского федерального исследовательского центра, были проведены экспериментальные исследования с бриллюэновским рефлектометром «Ando AQ 8603» при содействии ЗАО «Москабель-Фуджикура».

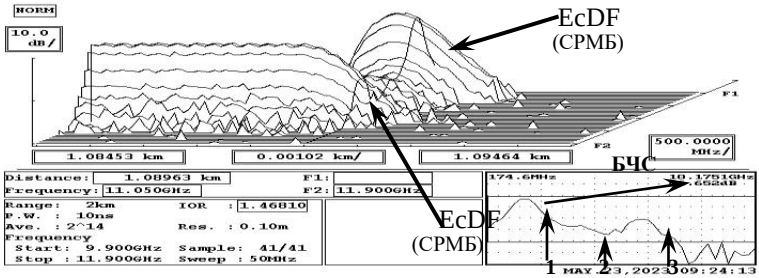


Рис. 1. Пространственное распределение СРМБ для EcDF

На рис. 1 представлено пространственное распределение СРМБ при нормальных условиях (при комнатной температуре и отсутствии продольного натяжения). В правом нижнем углу (рис. 1) показан профиль СРМБ и величина БЧС для EcDF. На рис. 2 для ОВ EcDF показана соответствующая мультирефлектограмма, которая представляет пространственные зависимости (по всей длине световода) натяжения (Strain), ширины СРМБ (B.S.W), профиля СРМБ) и уровня обратно отражённого сигнала (Loss), с указанием характерных участков и положения БЧС [1 - 3].

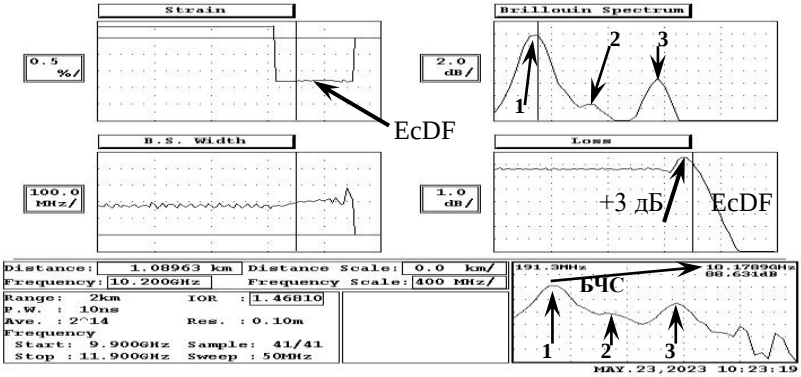


Рис. 2. Мультирефлектограмма для EcDF

Профиль СРМБ EcDF имеет максимум на частоте 10.18 ГГц (что соответствует величине БЧС), но при этом наблюдаются побочные «пики»: 2-й (малый) – на частоте 10.6 ГГц и 3-й (средний, на 7 дБ менее основного) – на частоте 11.05 ГГц. На графике уровня обратно отражённого сигнала хорошо заметен подъём («горб») примерно на 2 дБ в начале EcDF, но через 3 м после него наблюдается стремительное падение уровня сигнала. Такой эффект у обычных ОВ не наблюдался. При нагреве EcDF до +70 °С происходит смещение СРМБ в сторону увеличения частоты («главный» максимум (БЧС) обнаруживается на частоте 10.21 ГГц, а 3-й – на частоте 11.09 ГГц).

Список литературы

1. Bogachkov I.V., Gorlov N.I. The experimental testing of the Mandelstam–Brillouin backscatter parameters in some varieties of optic fibers // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, Dynamics 2022 Proceedings. 2022. P. 1-5.

2. Bogachkov I.V. The experimental researches of the Mandelstam–Brillouin scatter characteristics in erbium optical fibers of various kinds // T-comm, 2019. V. 13. No. 4. P. 70-75.

3. Bogachkov I.V. Researches of the Mandelstam–Brillouin backscatter spectrum in the erbium-doped optical fiber // T-comm, 2017. V. 11. No. 6. P. 59-63.

И.В. БОГАЧКОВ
Омский государственный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАССЕЯНИЯ МАНДЕЛЬШТАМА–БРИЛЛЮЭНА В ЭРБИЕВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ЦЕРИЯ

В работе представлены результаты экспериментальных исследований характеристик рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в эрбиевых оптических волокнах с повышенным содержанием церия.

I.V. BOGACHKOV
Omsk State Technical University

RESEARCHES OF THE MANDELSTAM–BRILLOUIN SCATTERING PARAMETERS IN ERBIUM OPTICAL FIBERS WITH INCREASED CERIUM ADDITIVES

In this work the results of experimental testing of the Mandelstam–Brillouin scatter characteristics of erbium optical fibers with increased cerium additives are presented.

Эрбиевые оптические волокна, легированные также ионами церия (EcDFs – erbium and cerium doped fibers) повышенной концентрации, имеют повышенную стойкость к радиации [1 - 3]. С целью изучения характеристик спектра рассеяния Мандельштама–Бриллюэна (СРМБ) в EcDF с повышенной концентрацией церия, предоставленного сотрудниками Пермского федерального исследовательского центра, были проведены исследования с бриллюэновским рефлектометром «Ando AQ 8603» при содействии ЗАО «Москабель-Фуджикура».

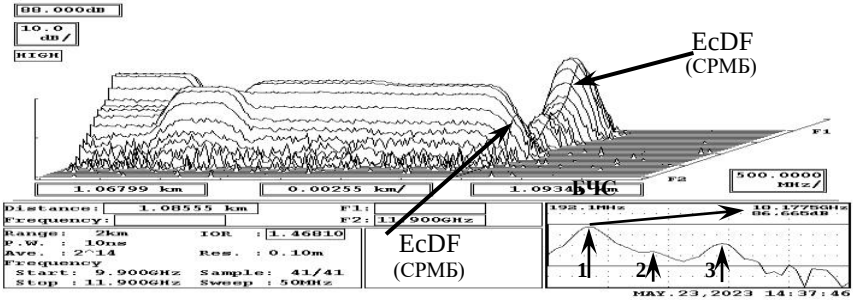


Рис. 1. Пространственное распределение СРМБ для ОВ-EcDF

На рис. 1 показано пространственное распределение СРМБ (по всей длине световода) при нормальных условиях (при комнатной температуре и отсутствии продольного натяжения). В правом нижнем углу (рис. 1) показан профиль СРМБ и величина БЧС для EcDF [2].

На рис. 2 для ОВ EcDF представлена соответствующая мультирефлектограмма: пространственные зависимости натяжения (Strain), ширины СРМБ (B.S.W), профиля СРМБ) и уровня обратно отражённого сигнала (Loss), с указанием характерных участков и положения БЧС [1 - 3].

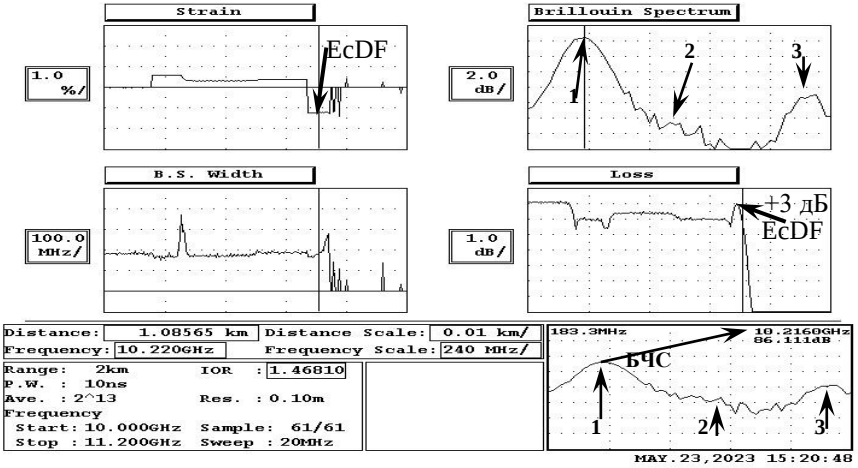


Рис. 2. Мультирефлектограмма для ОВ-EcDF

Профиль СРМБ EcDF имеет максимум на частоте 10.2 ГГц (БЧС), но при этом наблюдаются побочные «пики»: 2-й (малый) – на частоте 10.7 ГГц и 3-й (средний, на 8 дБ менее основного) – на частоте 11.1 ГГц.

На графике уровня обратно отражённого сигнала хорошо заметен подъём примерно на 2 дБ в начале EcDF, но через 3 м после него наблюдается заметное падение уровня сигнала. Данный эффект позволяет отличать эрбиевые ОВ от других разновидностей ОВ.

Отличия в характеристиках СРМБ (и БЧС) можно использовать для классификации разновидностей ОВ.

Список литературы

1. Богачков И.В., Трухина А.И. // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2017. Т. 8. № 3. С. 15-18.

2. Богачков И.В. // Вестник СибГУТИ. 2021. Вып. 2. С. 88-99.

3. Богачков И.В. // Оптическая рефлектометрия. Пермь, 2018. С. 60-62.

УДК 535(06)+004(06)

И.В. БОГАЧКОВ
Омский государственный технический университет

ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СПЕКТРА РАССЕЯНИЯ МАНДЕЛЬШТАМА–БРИЛЛЮЭНА В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ СО СМЕЩЁННОЙ ДЛИНОЙ ВОЛНЫ ОТСЕЧКИ

В докладе представлены результаты исследований характеристик рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в одномодовом оптическом волокне G.654 (со смещённой длиной волны отсечки).

I.V. BOGACHKOV
Omsk State Technical University

RESEARCHES SPECTRUM CHARACTERISTICS OF THE MANDELSTAM–BRILLOUIN SCATTER IN THE CUT-OFF SHIFTED FIBERS

In the paper the results of experimental testing of the Mandelstam–Brillouin scatter characteristics of the optical fiber G.654 (cut-off shifted fiber) are presented.

В настоящее время актуальной задачей является классификация разновидностей оптических волокон (ОВ) различных производителей, которые могут находиться в проложенных оптических кабелях (ОК) [1, 2].

ОВ G.654 (рекомендация МСЭ–Т G.654 – ОВ со смещённой длиной волны отсечки, равной 1530 нм) предназначено для высокоскоростных наземных оптических сетей большой протяжённости. Это ОВ имеет достаточно низкие потери на макроизгибе, улучшенные характеристики хроматической дисперсии для диапазона длин волн 1530-1625 нм, диапазон номинального диаметра модового поля [1, 3].

Для оценки величины бриллюэновского частотного сдвига (БЧС) и изучения характеристик спектра рассеяния Мандельштама–Бриллюэна (СРМБ) в ОВ следует для всех анализируемых разновидностей ОВ получить бриллюэновские рефлектограммы [2, 3].

Для этого были проведены экспериментальные исследования с БОИР (бриллюэновским импульсным рефлектометром) «Ando AQ 8603».

На рис. 1 представлено пространственное распределение СРМБ вдоль световода ($ОВ_Н$ – нормализующая катушка G.652; остальные ОВ G.654: “Fujikura nature” – “OB-FN”, “Fujikura guide TM” – “OB-FT”; и “Corning” – “OB-Cor”). На рис. 2 представлена соответствующая мультирефлектограмма, которая представляет зависимости по всей длине

световода натяжения (Strain), ширины и профиля СРМБ) и уровня обратно отражённого сигнала (Loss), с указанием характерных участков [1].

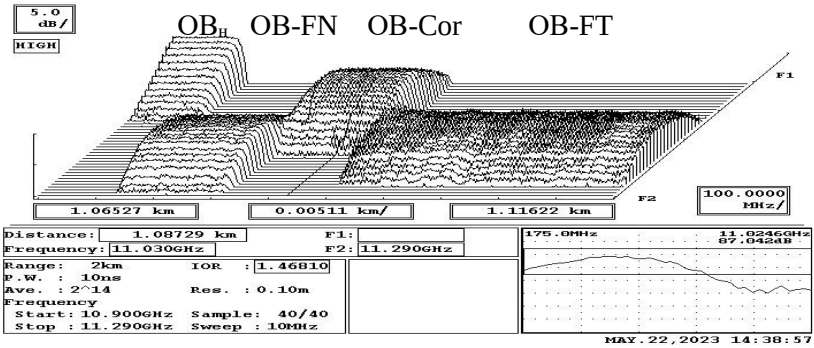


Рис. 1. Пространственное распределение СРМБ вдоль световода

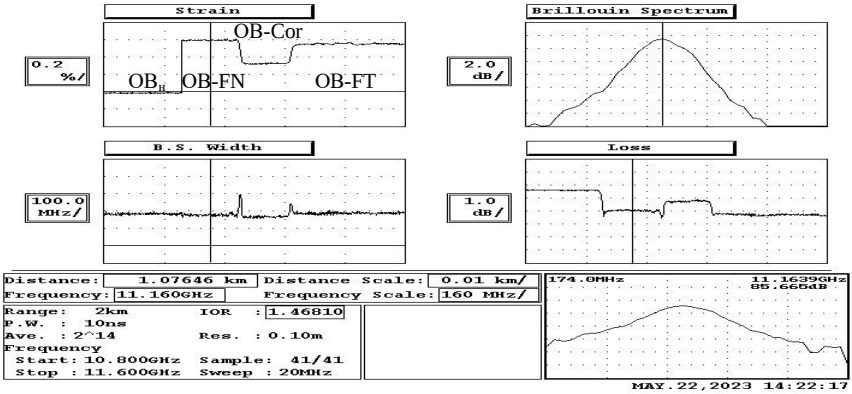


Рис. 2. Мультирефлектограмма для световода с G.654

Величина БЧС при комнатной температуре и отсутствии продольного натяжения для ОВ “Fujikura nature” составила 11.16 ГГц, для ОВ “Corning” – 11.03 ГГц, а для ОВ “Fujikura guide TM” – 11.14 ГГц.

Отличия характеристик СРМБ и БЧС позволят отличать участки с разными типами ОВ.

Список литературы

1. Богачков И.В., Горлов Н.И. // Приборы и техника эксперимента, 2023. № 5. С. 70-77.

2. Богачков И.В. // Вестник СибГУТИ. 2021. Вып. 2. С. 88-99.

3. Богачков И.В. // Сб. тр. XII Межд. конф. по фотонике и информационной оптике. М.: НИЯУ МИФИ, 2023. С. 466-467.

УДК 535(06)+004(06)

И.В. БОГАЧКОВ
Омский государственный технический университет

ИЗУЧЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАССЕЯНИЯ МАНДЕЛЬШТАМА–БРИЛЛЮЭНА В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ G.654 “FUJIKURA PURE ADVANCE”

В работе представлены результаты исследований параметров рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в оптическом волокне G.654 (со смещённой длиной волны отсечки) разновидностей “Fujikura Pure Advance”.

I.V. BOGACHKOV
Omsk State Technical University

RESEARCHES PARAMETERS OF THE MANDELSTAM–BRILLOUIN SCATTER IN THE G.654 “FUJIKURA PURE ADVANCE” FIBERS

In this work the results of experimental testing of the Mandelstam–Brillouin scattering parameters of the optical fiber “Fujikura Pure Advance” (G.654 – cut-off shifted fiber) are presented.

Оптические волокна (ОВ) “Fujikura Pure Advance” G.654 (ОВ со смещённой длиной волны отсечки) предназначены для высокоскоростных наземных оптических сетей большой протяжённости. Классификация ОВ различных типов и производителей является в данное время актуальной задачей [1 - 3]. Для оценки величины бриллюэновского частотного сдвига (БЧС) и изучения характеристик спектра рассеяния Мандельштама–Бриллюэна (СРМБ) в ОВ G.654 необходимо для всех анализируемых разновидностей ОВ получить бриллюэновские рефлектограммы [2, 3]. Для этого были проведены экспериментальные исследования с бриллюэновским рефлектометром «Ando AQ 8603».

На рис. 1 представлено пространственное распределение СРМБ вдоль световода ($ОВ_Н$ – нормализующая катушка G.652; остальные ОВ G.654: “Fujikura nature” – “FN”, “Fujikura Pure Advance 80” – “P80” и “Fujikura Pure Advance 110” – “P110”, и в конце “EDF AE”).

На рис. 2 представлена соответствующая мультирефлектограмма, которая представляет зависимости по всей длине световода натяжения (Strain), ширины и профиля СРМБ) и уровня обратно отражённого сигнала (Loss), с указанием характерных участков [1].

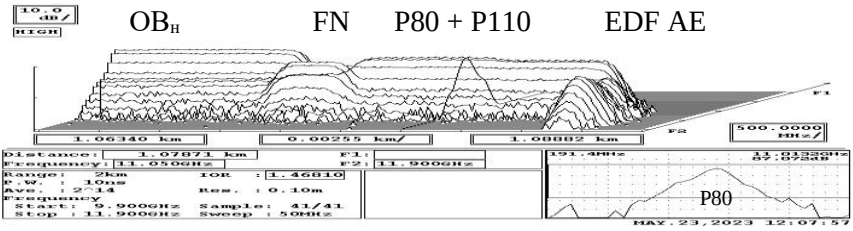


Рис. 1. Пространственное распределение СРМБ вдоль световода

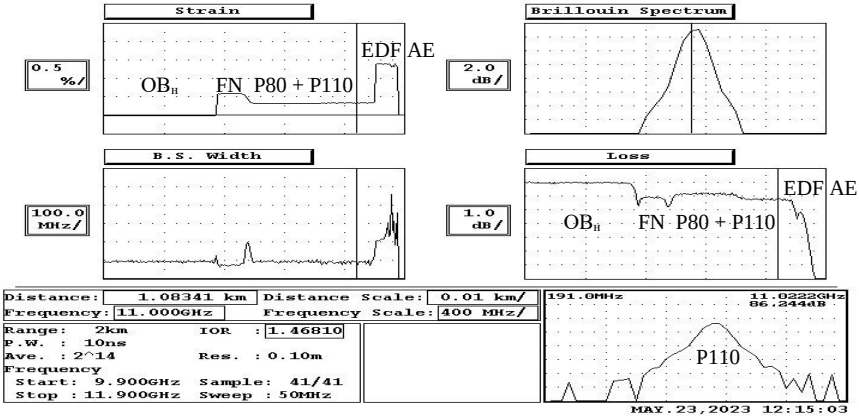


Рис. 2. Мультирефлектограмма для световода с G.654

Величина БЧС при комнатной температуре и отсутствии продольного натяжения для ОВ “Fujikura nature” составила 11.160 ГГц, для ОВ “Fujikura Pure Advance 80” – 11.013 ГГц, а для ОВ “Fujikura Pure Advance 110” – 11.022 ГГц.

У EDF заметен характерный подъём на графике “Loss”.

Отличия характеристик СРМБ и БЧС позволят отличать участки с разными типами ОВ.

Список литературы

1. Богачков И.В., Горлов Н.И. Экспериментальные исследования характеристик рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в одномодовых оптических волокнах различных видов // Приборы и техника эксперимента, 2023. № 5. С. 70-77.

2. Богачков И.В. Определение профиля спектра рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в оптических волокнах различных видов // Вестник СибГУТИ. 2021. Вып. 2. С. 88-99.

3. Богачков И.В. Исследования характеристик рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в оптическом волокне со смещённой длиной волны отсечки // Сб. тр. XII Междунар. конф. по фотонике и информационной оптике. М.: НИЯУ МИФИ, 2023. С. 466-467.

УДК 535(06)+004(06)

Э.В. ГАРМАЕВА
Бурятский институт инфокоммуникаций (филиал) Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики, Улан-Удэ

РАСПРЕДЕЛЁННЫЕ ОПТОВОЛОКОННЫЕ ДАТЧИКИ БРИЛЛЮЭНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ

Приведены новые свойства бриллюэновского рассеяния на основе волокон нескольких типов, в которых представлены новые методы повышения производительности бриллюэновского зондирования для нужд распределённых волоконно-оптических датчиков и волоконно-оптической метрологии.

E.V. GARMAEVA
Buryat Institute of Infocommunications – branch of Siberian State University of Telecommunications and Information Science, Ulan-Ude

DISTRIBUTED FIBER-OPTIC BRILLOUIN SCATTERING SENSORS

New properties of Brillouin scattering based on several types of fibers are presented, which present new methods for improving the performance of Brillouin sensing for the needs of distributed fiber-optic sensors and fiber-optic metrology.

Устройство или система, способные обнаруживать, измерять и точно воспроизводить конкретную физическую или химическую переменную (измеряемую величину) в электрической области, могут быть признаны датчиком или системой датчиков [1]. Если в таких датчиках используется свет, а измеряемая величина изменяет некоторые свойства света, устройство называется фотонным или оптическим датчиком. Эти изменения световых свойств обычно происходят в преобразовательной части датчика. В фотонных устройствах волоконные датчики используют оптические волокна и технологии вокруг них [1]. Распределённые волоконно-оптические датчики способны обнаруживать и измерять переменные вдоль волокна, которое функционирует как распределённый преобразователь и как оптический канал. Некоторые примеры сенсорных волокон показаны на рис. 1 и 2. Представлены три волокна: для измерения деформации, для измерения температуры и для одновременного измерения деформации и температуры. Изображение предоставлено Группой фотонной инженерии Университета Нью-Йорка, Кантабрия.

Бриллюэновское рассеяние – явление, сильно зависящее от температуры среды, её энтропии и плотности вещества. В большинстве случаев эти переменные влияют на частотный сдвиг или ширину линии бриллюэновского спектра. Эту зависимость можно использовать для косвенного определения влияния внешних или собственных вариаций среды, в которой происходит рассеяние. Кроме того, процесс бриллюэновского сдвига может быть точным, локализованный вдоль волокна, среди прочего, с помощью методов временной области или частотной корреляции. Следовательно, бриллюэновское рассеяние света в оптических волокнах может быть использовано в качестве основы для разработки точных распределённых оптических датчиков и оптических устройств. В этих случаях оптическое волокно представляет собой среду, в которой происходит взаимодействие распределенного преобразователя и оптического канала. Эти датчики способны измерять изменение конкретного параметра по всему оптоволоконному преобразователю с заданной точностью [2 - 5].



Рис. 1. Оптоэлектронный датчик распределенной сенсорной системы Бриллюэна



Рис. 2. Волоконные датчики температуры и деформации

Список литературы

1. Handbook of Optical Fiber Sensing Technology /ed by J.M. Lopez-Higuera. USA: John Wiley & Sons, 2002.

2. Alahbabi M., Cho Y.T., Newson T.P. 150 km-range distributed temperature sensor based on coherent detection of spontaneous Brillouin backscatter and in-line Raman amplification // Journal of the Optical Society of America B. 2005. V. 22. No. 6. P. 1321-1324.

3. Alahbabi M., Cho Y.T., Newson T.P. Comparison of the methods for discriminating temperature and strain in spontaneous Brillouin-based distributed sensors // Optics Letters. 2004. V. 29. No. 1. P. 26-28.

4. Cho Y.T., Alahbabi M., Gunning M.J., Newson T.P. 50 km single-ended spontaneous Brillouin-based distributed-temperature sensor exploiting pulsed Raman amplification // Optics Letters. 2003. V. 28. No. 18. P. 1651-1653.

5. Maughan S.M., Kee H.H., Newson T.P. 57 km single-ended spontaneous Brillouin-based distributed fiber temperature sensor using microwave coherent detection // Optics Letters. 2001. V. 26. No. 6. P. 331-333.

УДК 535(06)+004(06)

И.В. БОГАЧКОВ
Омский государственный технический университет

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАЧАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ БРИЛЛЮЭНОВСКОГО СДВИГА ЧАСТОТЫ В ОДНОМОДОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ

В работе представлены результаты новых экспериментальных исследований одномодовых оптических волокон, приведены величины начальных уровней бриллюэновского сдвига частоты.

I.V. BOGACHKOV
Omsk State Technical University

DETERMINATION OF INITIAL VALUES OF THE BRILLOUIN FREQUENCY SHIFT IN SINGLE-MODE OPTICAL FIBERS

The results of new experimental researches of single-mode optical fibers are presented in this work. The values of initial levels of the Brillouin frequency shift are determined.

В настоящее время актуальной задачей является классификация разновидностей оптических волокон (ОВ) различных видов и разных производителей [1 - 3].

Для оценки величины бриллюэновского частотного сдвига (БЧС) и изучения характеристик спектра рассеяния Мандельштама–Бриллюэна (СРМБ) в ОВ следует для всех анализируемых разновидностей ОВ получить рефлектограммы от бриллюэновского импульсного рефлектометра (БОИР) [2, 3]. Для этого были проведены экспериментальные исследования с БОИР “Ando AQ 8603”.

Соединение отрезков нескольких изучаемых разновидностей ОВ в единый световод существенно увеличивает скорость получения итоговых результатов измерений. По полученным итоговым общим зависимостям, полученным с помощью БОИР, можно наблюдать изменения СРМБ, определять БЧС и изучать профили СРМБ различных типов ОВ, входящих в световод [1, 2]. Экспериментальные исследования показали, что даже у похожих разновидностей, но разных производителей характеристики СРМБ и БЧС существенно различаются [1 - 3].

Изучение с помощью бриллюэновского рефлектометра особенностей поведения СРМБ в ОВ различных видов и производителей позволили установить начальные значения БЧС (f_{B0}) для всех исследованных разновидностей ОВ. В табл. 1 сведены значения БЧС для всех проанализированных в последних экспериментах типов ОВ, а также для некоторых ранее проанализированных ОВ (*$_0$) [1 - 3].

Таблица 1. Значения бриллюэновского частотного сдвига для оптических волокон

Разновидность ОВ	Значения f_{B0}, ГГц	Рекомендуемые значения f_{B0}, ГГц
G.6520	10.82 ... 10.86	10.84
G.6530 (DSF)	10.47 ... 10.49	10.47
G.654E “S”	11.021 ... 11.025	11.02
G.654E “FN”	11.163 ... 11.182	11.17
G.654 “Corn”	11.028 ... 11.036	11.03
G.654E “FT”	11.138 ... 11.150	11.14
G.654E “P80”	11.003 ... 11.016	11.01
G.654E “P110”	11.037 ... 11.043	11.04
G.655$_0$ (LEAF)	10.66 ... 10.67	10.66
G.655$_0$	10.47 ... 10.48	10.48
G.657$_0$	10.77 ... 10.80	10.79
EDF0	10.69 ... 10.71	10.70
EDF “AE”	11.57 ... 11.69	11.59
EDF–2	10.95	10.95
ECDF0	10.38 ... 10.39	10.38
ECDFмал	10.21 ... 10.22	10.21
ECDFбол	10.18 ... 10.19	10.18
“Panda0”	10.40 ... 10.43	10.42
“Panda PS-887”	10.55 ... 10.56	10.55
“Panda 2S”	10.77 ... 10.78	10.77
“Panda 5S”	10.79 ... 10.80	10.79

Отличия характеристик СРМБ и БЧС позволят отличать участки с разными типами ОВ.

Список литературы

1. Bogachkov I.V. Researches of the Mandelstam–Brillouin backscatter spectrum in the erbium-doped optical fiber // T-comm, 2017. V. 11. No. 6. P. 59-63.

2. Богачков И.В., Горлов Н.И. Экспериментальные исследования характеристик рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в одномодовых оптических волокнах различных видов // Приборы и техника эксперимента, 2023. № 5. С. 70-77.

3. Богачков И.В. Определение профиля спектра рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в оптических волокнах различных видов // Вестник СибГУТИ. 2021. Вып. 2. С. 88-99.

УДК 535(06)+004(06)

Н.В. ПЧЕЛКИНА, Ж. РАБЕНАНДРАСАНА, Д.Д. ЧИЖИН
Московский технический университет связи и информатики

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ГРАДИРЕН НА РАБОТУ АТМОСФЕРНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ

Проанализировано влияние систем технического водоснабжения градирен на работу атмосферной оптической линии связи при её развёртывании на промышленных площадках. Рассчитаны ослабление лазерного излучения и коэффициент пропускания атмосферы для условий повышенной влажности при работе градирен.

N.V. PCHELKINA, J. RABENANDRASANA, D.D. CHIZHIN
Moscow Technical University of Communications and Informatics

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF INDUSTRIAL COOLING TOWERS ON THE OPERATION OF ATMOSPHERIC OPTICAL COMMUNICATION LINES

The influence of technical water supply systems of cooling towers on the operation of an atmospheric optical communication line during its deployment on industrial sites is analyzed. The attenuation of laser radiation and the atmospheric transmittance for conditions of high humidity during the operation of cooling towers are calculated.

В последнее время повышенное внимание уделяется системам атмосферной оптической линии связи (АОЛС), их внедрению в системы связи различных промышленных предприятий, в том числе с перспективой реализации технологии квантового распределения ключа. Современные АОЛС работают в пределах прямой видимости, устойчиво функционируют при дожде и в снег, к ограничению работы может приводить густой туман, смог [1]. Анализ перспектив установки терминалов АОЛС на промышленных площадках показал, что важно учитывать наличие охлаждающих систем оборотного водоснабжения с испарительными градирнями. Строительство градирен осуществляется с учётом метеорологических условий (температура, относительная влажность воздуха, скорость и направление ветра), чтобы испаряемое ими облако водяного пара вытягивалось преимущественно в направлении ветра от промышленных площадок [2].

Целью работы является оценка влияния повышенной влажности на ослабление лазерных импульсов при поглощении их парами воды.

Был рассчитан спектральный коэффициент пропускания атмосферы $\tau_{ВП}$ и определено ослабление лазерного излучения парами воды $k_{ВП}$ для промышленных территорий Курского региона. По метеоданным среднее значение относительной влажности за период с 01.06.2015 по настоящее время составляет 72 % [3].

Для оценки поглощения лазерного излучения водяным паром было рассчитано количество осаждённой воды ω, представляющее собой толщину слоя воды в мм, которая получится, если при заданном сечении слоя весь содержащийся в атмосфере водяной пар превратить в воду, для температуры воздуха +25 °С, влажности 72 % и 100 % на дистанции 1 км. В результате было получено: $\omega_{72\,\%} = 1.658$ мм и $\omega_{100\,\%} = 2.302$ мм. Для данных значений количества осаждённой воды определили спектральные коэффициенты пропускания излучения парами воды для 1,5 мкм: $\tau_{ВП72\,\%} = 0.988$ и $\tau_{ВП100\,\%} = 0.982$ [1].

Ослабление лазерного излучения парами воды $k_{ВП}$ и коэффициент пропускания атмосферы $\tau_{ВП}$ связаны зависимостью:

$$k_{ВП} = -\lg(\tau_{ВП}/L),$$

где L – дистанция, км.

Расчёты показали, что значение ослабления лазерного излучения парами воды для длины трассы 1 км составило 0,008 дБ/км, а при максимальном значении слоя осаждённой воды в 1 м коэффициент ослабления излучения с длиной волны 1,5 мкм не превышает 0,616 дБ/км. Так как запас по усилению на 1 км для всех моделей АОЛС не меньше 27 дБ [1], то градирни, имеющиеся на промышленных площадках, при установке терминалов АОЛС не окажут существенного влияния на доступность канала связи.

Список литературы

1. Bolotov D.V., et al. // 2022 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). 2022. P. 1-5.

2. Zargar A., Kodkani A., Peris A., Clare E., et al. Numerical analysis of a counter-flow wet cooling tower and its plume // Internation al Journal of Thermofluids. 2022. V. 14. P. 100139.

3. Архив погоды в Курске Восточном (аэропорт). METAR https://rp5.ru.

УДК 535(06)+004(06)

А.В. ПОЛЯКОВ, К.С. ЮДЫЦКАЯ
Белорусский государственный университет, Минск

ВЛИЯНИЕ МЕЖСИМВОЛЬНЫХ ПОМЕХ НА ПРОЦЕСС ДИНАМИЧЕСКОГО ХРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ В ОПТОВОЛОКОННОЙ БУФЕРНОЙ ПАМЯТИ

Приведены результаты исследования совместного влияния межсимвольных помех, фазовой самомодуляции, хроматической и поляризационной модовой дисперсии на время хранения информации при заданной вероятности ошибки в волоконно-оптических динамических запоминающих устройствах.

A.V. POLYAKOV, K.S. YUDYTSKAYA
Belarussian State University, Minsk

INFLUENCE OF INTERSYMBOL INTERFERENCE ON THE PROCESS OF DYNAMIC INFORMATION STORAGE IN FIBER OPTICAL BUFFER MEMORY

The results of a study of intersymbol interference, self-phase modulation, chromatic and polarization mode dispersion joint influence on the information storage time at a given error probability in fiber-optic dynamic storage devices are presented.

Современное развитие телекоммуникационных систем оптического диапазона, связанное с резким возрастанием скорости и объёма передаваемой информации, требует применения специальных мер, направленных на промежуточное хранение информационного потока для его последующей обработки. Одним из перспективных направлений решения подобных задач создания быстродействующей буферной памяти является использование волоконно-оптических динамических запоминающих устройств (ВОДЗУ) с технологией плотного спектрального мультиплексирования. В [1] представлена разработанная архитектура цифрового ВОДЗУ с использованием DWDM-технологии, в которой для увеличения времени хранения информации в оптическом диапазоне осуществлялась 2R–регенерация (re-amplifying+re-shaping) циркулирующих информационных сигналов с помощью нелинейного оптического кольцевого зеркала. Установлено [2], что при совместном влиянии амплитудных флуктуаций, хроматической, поляризационной модовой дисперсии, временного джиттера, межсимвольных помех время хранения при заданной вероятности ошибки $BER \leq 10^{-9}$ имеет максимум

для длины оптоволоконной петли, равной 19 км. Показано, что значение этой длины не зависит от скорости поступающей информации и пиковой мощности оптических импульсов на входе ВОДЗУ.

Одним из важных факторов, влияющих на время хранения информации, является величина межсимвольных помех. Межсимвольные помехи обусловлены тем, что часть энергии, относящаяся к одному тактовому интервалу, поступала на фотоприёмник в течение следующего интервала. При передаче символа «1» такая помеха приводила к уменьшению величины интенсивности сигнальных отсчётов, а в случае символа «0» появлялась дополнительная шумовая составляющая.

На практике, для того чтобы величина межсимвольных помех не превышала 1 дБ, длительность циркулирующих импульсов τ должна удовлетворять условию $\tau/T_i \le 0{,}6$, где T_i – длительность тактового интервала. В результате численного моделирования на основе разработанной математической модели установлено, что совместное влияние хроматической, поляризационной модовой дисперсии и фазовой самомодуляции приводит к первоначальному сжатию и последующему расширению длительности циркулирующих импульсов. Показано, что учёт поляризационной модовой дисперсии приводит к увеличению значения числа циркуляций N, на которой наблюдается минимум τ, на 30 %. Поскольку влияние фазовой самомодуляции зависит от суммарной мощности излучения, вводимой в волокно, получили, что значения N, соответствующие минимуму τ, уменьшаются на 18 - 20 % при условии, что на входе каждого из 32 спектральных информационных каналов пиковая мощность изменяется случайным образом от 1,5 мВт до 10 мВт по сравнению с вариантом, когда на входе ВОДЗУ все 32 канала имели одинаковую мощность 2 мВт. Из полученных результатов следует, что нет необходимости восстанавливать длительность информационных импульсов на каждом цикле рециркуляции, а значения N, удовлетворяющие условию $\tau/T_i \le 0{,}6$, при достижении которых необходимо осуществлять $2R$-регенерацию, необходимо выбирать, исходя из непосредственной загруженности информационных каналов ВОДЗУ.

Список литературы

1. Polyakov A.V. // Optical Memory and Neural Networks. 2020. V. 29. No. 2. P. 100-109.

2. Поляков А.В., Юдыцкая К.С. // VII Международная научно-практическая конференция «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния». 2023. С. 435-436.

УДК 535(06)+004(06)

А.В. БАХУС, К.Ю. ЕРОХИН, С.Ю. КАЗАНЦЕВ
Московский технический университет связи и информатики

ВЛИЯНИЕ ФОНА НА ПЕРЕДАЧУ КВАНТОВОГО КЛЮЧА В СВОБОДНОЙ АТМОСФЕРЕ, РЕАЛИЗОВАННОЙ НА ТЕРМИНАЛАХ АОЛС M1-40GE

Разработаны экспериментальный стенда и методики для исследований влияния фоновых засветок, попадающих в квантовый канал систем атмосферной оптической связи, реализованной на оптических терминалах АОЛС, компании АО «МОСТКОМ». Установлено, что без применения дополнительного спектрального фильтра, фоновые засветки от естественных источников света и излучение от информационных каналов проникает в квантовый канал, тем самым увеличивая частоту темнового счёта детектора более чем на порядок. Установка серийного полосового DWDM-фильтра перед детектором одиночных фотонов позволяет обеспечить штатную работу детектора в системах КРК.

A.V. BAHUS, K.Yu. EROKHIN, S.Yu. KAZANTSEV
Moscow Technical University of Communications and Informatics

BACKGROUND INFLUENCE ON QUANTUM KEY DISTRIBUTION IN A FREE ATMOSPHERE IMPLEMENTED ON AOCS M1-40GE TERMINALS

An experimental stand and methods have been developed to study the influence of background illumination entering the quantum channel of atmospheric optical communication systems, implemented on the AOCS optical terminals of the MOSTKOM JSC company. It has been established that without the use of an additional spectral filter, background illumination from natural light sources and radiation from information channels penetrates the quantum channel, thereby increasing the dark counting frequency of the detector by more than an order of magnitude. Installing a serial DWDM band pass filter in front of the single photon detector eliminates the destructive influence of background radiation.

В работах [1, 2] продемонстрирована перспектива построения систем квантового распределения ключей (КРК) в свободной атмосфере на основе применения серийных модулей атмосферной оптической связи (АОЛС) компании АО «МОСТКОМ». Для оборудования КРК, которое тестируется на возможность работы в АОЛС, важно системно изучить воздействие различных факторов на передачу квантовых данных в свободной атмосфере, поэтому с учётом результатов исследований [3, 4],

установка [2], была доработана для изучения влияние не только оптических потерь на атмосферной трассе, но и влияние фонового излучения [4]. В настоящей работе представлены результаты исследований спектров фонового излучения, попадающего в оборудование КРК в зависимости от времени суток, а также эффективности и частоты темновых отсчётов детектора одиночных фотонов (ДОФ) в установке НОК EMQOS 1.0. [4, 5]. Для определения параметров ДОФ использовалась методика [5]. Установлено, что установка полосового DWDM фильтра в EMQOS 1.0. позволяет реализовать КРК в условиях дневного освещения. Диаграммы, представленные на рис. 1, иллюстрируют, как установка перед ДОФ полосового фильтра DWDM-1T-MOD555-38 нивелирует деструктивное влияние фона.

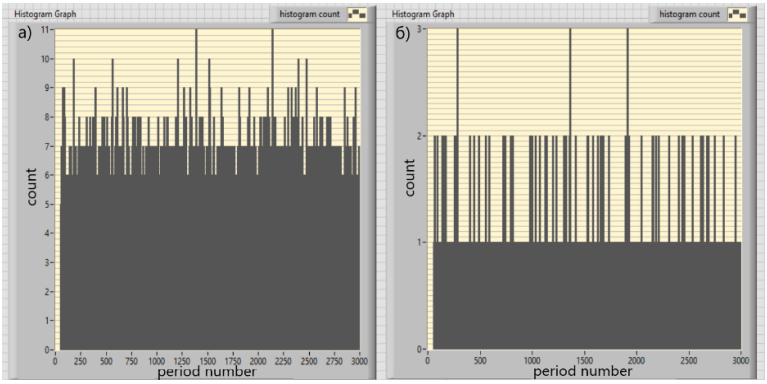


Рис. 1. Гистограммы темнового счёта при влиянии фоновой засветки (а) и с подключённым полосовым фильтром (б)

Список литературы

1. Боев А.А. и др. // Письма в журнал технической физики. 2022. Т. 48. № 15. С. 15-18.

2. Воробей С.С. и др. // Лазерно-информационные технологии 2022: труды XXX Международной научной конференции. Новороссийск, 2022. С. 80-81.

3. Bolotov D.V., Kuzmin M.S., Nasaraia A.P., Pchelkina N.V., Kuznetsov S.N. // Wave Electronics and Its Application in Information and Telecommunication Systems. 2022. V. 5. No. 1. P. 57-61.

4. Казанцев С.Ю. и др. // Наука, техника, педагогика в высшей школе: Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Москва: МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХ, 2023. С. 205-211.

5. Рабенандрасана Ж., Казиева Т.В., Трофимов Н.С., Бахус А.В. // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2023. Т. 14. № 3. С. 41-47.

УДК 535(06)+004(06)

А.А. МАРКВАРТ, Н.С. СЕДОВ, Л.Б. ЛИОКУМОВИЧ,
Н.А. УШАКОВ
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ОПТОВОЛОКОННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ–ПЕРО С УВЕЛИЧЕННЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ ОТРАЖЕНИЯ

Приведены результаты экспериментов по оценке среднеквадратических отклонений найденных значений баз оптоволоконных интерферометров Фабри–Перо, опрашиваемых методом спектральной интерферометрии с использованием суперлюминисцентного диода и спектрометра.

A.A. MARKVART, N.S. SEDOV, L.B. LIOKUMOVICH,
N.A. USHAKOV
Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

RESOLUTION OF THE FABRY–PEROT FIBER-OPTIC INTERFEROMETER WITH INCREASED REFLECTION COEFFICIENTS

The results of experiments to estimate the standard deviations of the demodulated values of the baselines of Fabry–Perot fiber-optic interferometers interrogated by spectral interferometry using a superluminescent diode and a spectrometer are presented.

Волоконно-оптические датчики на основе внешнего интерферометра Фабри–Перо (ВИФП) позволяет измерять температуру, деформацию, давление и так далее, и при этом являются востребованными благодаря высокой точности измерений, электромагнитной нейтральности и компактным размерам [1]. ВИФП образован торцом оптического волокна с коэффициентом отражения R_1 и внешним зеркалом с коэффициентом отражения R_2, расположенным параллельно на расстоянии L. Ключевой характеристикой ВИФП является разрешающая способность измерения L. В работе [2] было продемонстрировано разрешение в 14 пм. В ней использовался метод спектральной интерферометрии, который включает измерение и обработку спектральной передаточной функции (СПФ) – зависимости интенсивности света, проходящего через ВИФП от длины волны. Обычно рассматривается ВИФП с коэффициентами отражения порядка 3,5 %. Однако было показано, что более высокое разрешение

может быть достигнуто за счёт увеличения R_2 [2, 3]. Для измерений использовался перестраиваемый лазер и фотоприёмник. В настоящей работе приведены аналогичные эксперименты с другим типом опросной аппаратуры: широкополосным источником и спектрометром.

Измерения были выполнены с использованием суперлюминисцентного диода EXALOS EXS210066-01 (λ_0 = 1.55 мкм, $\Delta\lambda$ = 160 нм, P = 5 мВт), спектрометра Ibsen I-MON USB 512 ($\Delta\lambda$ – 1510 - 1595 нм). Интерферометры были сформированы торцами патчкордов SMF-28 с разъёмами FC/UPC в адаптере FC-FC (рис. 1). Были реализованы пять комбинаций ВИФП: 1) $R_1 = R_2 = 3{,}5$ %; 2) $R_1 = 3{,}5$ %, $R_2 = 30$ %; 3) $R_1 = 3{,}5$ %, $R_2 = 100$ %; 4) $R_1 = 30$ %, $R_2 = 30$ %; 5) $R_1 = 30$ %, $R_2 = 100$ %. Длина зазора между торцами волокон L варьировалась от 15 до 700 мкм. Измерения проводились в течение приблизительно 300 мс для каждого значения L, в результате чего было получено в общей сложности 300 СПФ для каждого L (частота опроса 1 кГц, время интегрирования 10 мкс). Далее от каждой измеренной СПФ было вычислено преобразование Фурье, фаза его отсчёта, имеющего наибольшую амплитуду, пересчитывалась в значение $L_н$. Результирующие среднеквадратичные отклонения (СКО) найденных $L_н$ для каждой установленной точки L обозначенные как $\sigma_{Lн}$, приведены на рис. 2. Как и в работе [3], результаты показали, что за исключением малых L варианты с $R_2 > R_1$ обеспечивают меньшее СКО, чем варианты с $R_2 = R_1$, благодаря компенсации расхождения света внутри резонатора ВИФП.

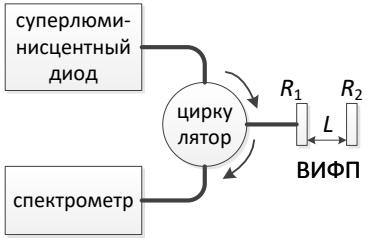


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

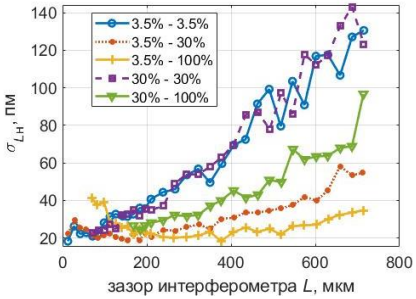


Рис. 2. СКО найденных $L_н$ при разных зазорах L

Список литературы

1. Islam R., Ali M.M., et al. // Sensors. 2014. V. 14. No. 4. P. 7451-7488.
2. Ushakov N.A., Liokumovich L.B. // Appl. Opt. 2014. V. 53. No. 23. P. 5092-5099.
3. Markvart A., Sedov N., Zavalishina L., Liokumovich L., Ushakov N. // Intern. Conf. on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). 2023. P. 436-438.

УДК 535(06)+004(06)

Д.Д. ЖУКОВСКИЙ, С.Ю. КАЗАНЦЕВ, Н.В. ПЧЕЛКИНА
Московский технический университет связи и информатики

ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ КВАНТОВОГО КАНАЛА СВЯЗИ В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Предложена концепция аппаратно программного комплекса для исследования влияния атмосферных возмущений на передачу квантового ключа в атмосферном канале связи. Стенд включает оптическую систему для формирования атмосферного канала связи, источник атмосферных турбулентностей, систему контроля искажения волнового фронта лазерного пучка и научно-образовательный комплекс EMQOS 1.0.

D.D. ZHUKOVSKY, S.Yu. KAZANTSEV, N.V. PCHELKINA
Moscow Technical University of Communications and Informatics

LABORATORY STAND FOR STUDYING THE INFLUENCE OF CONTROLLED OPTICAL PERTURBATIONS ON THE CHARACTERISTICS OF A QUANTUM COMMUNICATION CHANNEL IN FREE SPACE

The concept of a hardware-software complex is proposed to study the influence of atmospheric disturbances on the transmission of a quantum key in an atmospheric communication channel. The stand includes an optical system for forming an atmospheric communication channel, a source of atmospheric turbulence, a system for monitoring laser beam wavefront distortion, and the EMQOS 1.0.

При реализации квантового распределения ключей (КРК) в атмосфере возникают значительные трудности, обусловленные воздействием атмосферных возмущений, которые особенно критичны для оптической связи с летательными аппаратами [1]. Поэтому актуальной задачей является разработка стенда для формирования контролируемых атмосферных возмущений и отработка методик для анализа их воздействия на основные характеристики квантового канала связи, что и было основной целью настоящей работы.

Нами была предложена концепция аппаратно-программного комплекса для формирования контролируемых атмосферных возмущений и анализа их воздействия на квантовый канал связи и создан макет комплекса,

представленный на рис. 1. Комплекс включает оптическую систему для приёма-передачи сигналов из волоконно-оптического тракта в атмосферу, при этом передача данных и квантового ключа осуществляется в телекоммуникационном диапазоне длин волн 1550 нм (С–полоса) аналогично [2]. Для квантового распределения ключа используется НОК EMQOS 1.0. [3]. НОК EMQOS 1.0. подключается к коллиматорам для создания атмосферного оптического канала связи, протяжённость которого составляла 50 см. Для генерации на трассе оптических возмущений используется электрический нагреватель, который за счёт неравномерного прогревания позволяет формировать атмосферные турбулентности (рис. 2). Для контроля оптических возмущений на оптической трассе, использовался датчик волнового фронта, основанный на эффекте Тальбота [4].

Таким образом, разработанный стенд позволяет одновременно фиксировать оптические возмущения (по тальбограммам), а НОК EMQOS 1.0. каждую секунду выдаёт длину квантового ключа и процент квантовых битовых ошибок (QBER).

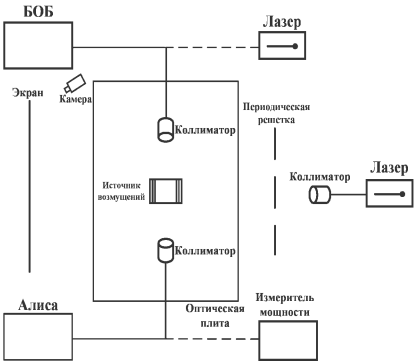


Рис. 1. Экспериментальная установка

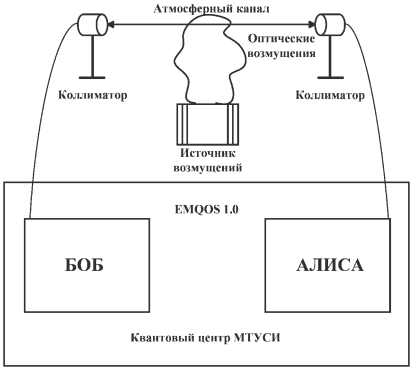


Рис. 2. КРК через турбулентность

Список литературы

1. Chiti F., Picchi R., Pierucci L. // IEEE Access. 2022. V. 10. P. 126062-126073.

2. Воробей С.С. и др. // Лазерно-информационные технологии 2022: труды XXX Международной научной конференции. Новороссийск, 2022. С. 80-81.

3. Рабенандрасана Ж. и др. // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2023. Т. 14. № 3. С. 41-47.

4. Rabenandrasana J., et al. // 2023 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). 2023. P. 1-8.

УДК 535(06)+004(06)

М.Х. ЭГАМОВ, Б.И. МАХСУДОВ[1]
Худжандский научный центр Национальной академии наук Таджикистана
[1]Таджикский национальный университет, Душанбе, Таджикистан

ЭФФЕКТ САМОФОКУСИРОВКИ, ИНДУЦИРУЕМЫЙ МАЛОМОЩНЫМ ЛАЗЕРОМ В ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ С ГИБРИДНОЙ ПЕРЕОРИЕНТАЦИЕЙ

Синтезированы стабилизированные полимером жидкокристаллические плёнки, допированные сурфактантом, в которых ориентация молекулы директора постепенно меняется с гомеотропной на одной поверхности на планарную в противоположной. Продемонстрировали нелинейно-оптический эффект гибридно ориентированной НЖК-плёнки за счёт фотоиндуцированной молекулярной переориентации при самой низкой интенсивности света – 400 мВт/см^2, что в 8,5 раз меньше интенсивности, необходимой для гомеотропно ориентированных ЖК-плёнок с таким же составом. Гибкая плёнка большой площади из исследуемых материалов может быть реализована в технологии отображения, которая обеспечивает гораздо более широкое применение нелинейной оптики.

M.Kh. EGAMOV, B.I. MAKHSUDOV[1]
Khujand Scientific Center of the National Academy of Sciences of Tajikistan
[1]Tajik National University, Dushanbe, Tajikistan

SELF-FOCUSING EFFECT INDUCED BY A LOW-POWER LASER IN LIQUID CRYSTALS WITH HYBRID REORIENTATION

Synthesized polymer-stabilized liquid crystal films doped with surfactant in which the orientation of the director molecule gradually changes from homeotropic on one surface to planar on the opposite surface. We also demonstrated the nonlinear optical effect of the hybrid-oriented LC film due to photoinduced molecular reorientation at the lowest light intensity of 400 mW/cm^2, which is 8.5 times less than the intensity required for homeotropically oriented LC films with the same composition. A flexible large-area film of the investigated materials can be utilized in a display technology that provides a much broader application of nonlinear optics.

В данной работе нами были исследованы изменения директора ЖК в зависимости от природы поверхности подложек при действии маломощного лазерного излучения с целью обнаружения нелинейных эффектов при гибридной переориентации молекул мягких сред. Исследовали управление этим нелинейно-оптическим эффектом с

помощью чрезвычайно простой установки [1]. Для этой цели была использована лазерная указка на батарейках мощностью 1 мВт (λ = 460 нм, Shenzhen Keyuan Co., Ltd., Китай) с небольшой линзой. Учитывая значительно более высокое поглощение при 460 нм в гибридно ориентированной ячейке, мы уменьшили концентрацию ПАВ в НЖК 5CB до 0,03 мол. % [2].

Было установлено, что интенсивность света, необходимая для создания эффекта самофокусировки, может быть снижена до уровней, доступных с помощью обычной ручной лазерной указки мощностью 1 мВт в диспергированном полимером ЖК-плёнке, допированном ПАВ ЦТАБ. Ключом к этому достижению является использования гибридной ориентации молекул вместо обычно используемого гомеотропного или планарного ЖК-выравнивания (рис. 1).



Рис. 1. Схема геометрии ячейки с гибридной (слева) и гомеотропной (справа) ориентации

Было показано, что эффект самофокусировки в гибридно ориентированных ячейках обратим, что является ещё одной важной особенностью, влияющей на реальное применение. Идентичные изменения коэффициента пропускания были наблюдены в течение нескольких циклов, который доказал, что нелинейно-оптическая молекулярная переориентация в выровненной по гибриду ячейке была обратимой. Следует отметить, что оптический отклик в гибридно ориентированной ячейке была ускорена в 10 раз по сравнению с обычной гомеотропно ориентированной ячейкой [2].

Список литературы

1. Smith N.J., Tillin M.D., Sambles J.R. // Phys. Rev. Lett. 2002. V. 88. P. 088301.

2. Pasechnik S.V., Chigrinov V.G., Shmeliova D.V., Tsvetkov V.A., Voronov A.N. // Liq. Cryst. 2004. No. 31. P. 585-592.

УДК 535(06)+004(06)

Д.А. ПЕРЕВОЩИКОВ, А.И. КАЛУГИН, Е.А. АНТОНОВ
Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск

ЗОНЫ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ ТИПА A^NB^{8-N}

Представлены результаты первопринципных теоретических расчётов электронной структуры и оптических свойств изоэлектронной серии кубических кристаллов α-Sn – InSb – CdTe – γ-AgI. Установлено изменение зонных параметров и оптических характеристик в зависимости от ионности химической связи при переходе от полуметалла α-Sn к широкозонному полупроводнику γ-AgI.

D.A. PEREVOSHCHIKOV, A.I. KALUGIN, E.A. ANTONOV
Udmurt Federal Research Center of Ural Branch RAS

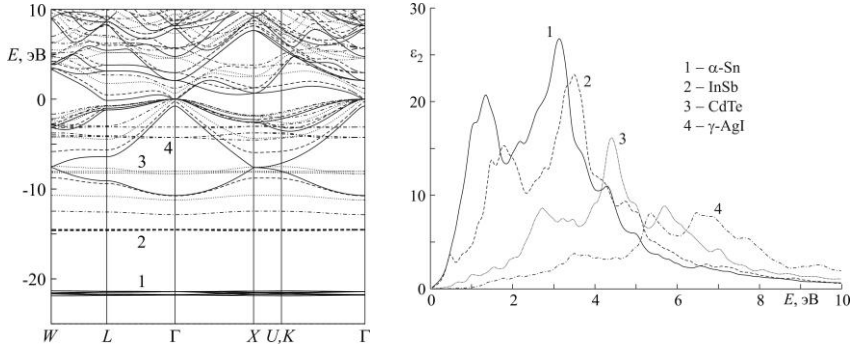
BAND STRUCTURES AND OPTICAL PROPERTIES OF A^NB^{8-N} CRYSTALS

The results of first-principles theoretical calculations of the electronic structure and optical properties of the isoelectronic series of cubic crystals α-Sn – InSb – CdTe – γ-AgI are presented. A change in band parameters and optical characteristics has been established depending on the ionicity of the chemical bond during the transition from the semimetal α-Sn to the wide-gap semiconductor γ-AgI.

Свойства твёрдых тел зависят от множества параметров. Одним из таких параметров является тип химической связи в кристалле. Известно, что большинство полупроводников и диэлектриков имеют не чисто ковалентный или ионный тип связи, а более сложный характер связи с долей ионности или ковалентности. От степени ионности химической связи в кристаллах существенно зависят электронные и оптические свойства материалов [1]. В данной работе приводятся результаты теоретических расчётов из первых принципов зон и оптических свойств изоэлектронной серии кубических кристаллов α-Sn – InSb – CdTe – γ-AgI. В исследуемом ряду степень ионности увеличивается от олова к иодиду серебра. Таким образом, интересно проследить характер изменений их оптических свойств в зависимости от ионности химической связи.

Расчёты выполнены методом FP-LAPW с помощью пакета программ [2]. Зонные структуры хорошо согласуются с известными данными [3]. Установлено, что при увеличении степени ионности *d*-зоны смещаются в область бóльших значений энергий, две верхние валентные зоны,

образованные *p*- и *s*-состояниями соответственно, значительно сужаются, зоны проводимости смещаются в область бóльших значений энергий с нулевого значения запрещённой зоны у α-Sn до 1.23 эВ у γ-AgI (рис. 1*а*). Выявлены эффекты перемешивания состояний верхней валентной зоны и зоны проводимости α-Sn и InSb в точке Γ зоны Бриллюэна.



а *б*

Рис. 1. Зонные структуры (*а*) и спектры мнимой части диэлектрической функции (*б*)

На рис. 1*б* представлены результаты расчётов спектров мнимой части диэлектрической (ε_2) проницаемости рассматриваемых кристаллов. С увеличением степени ионности химических связей спадает интенсивность основных полос интегральных спектров, энергии максимумов смещаются в область бóльших значений энергии. Детальный расчёт вкладов переходов между отдельными парами зон позволил выявить закономерности изменений природы максимумов полос спектров ε_2. Кроме того, установлены локализации переходов между парами валентных зон и зон проводимости в зоне Бриллюэна, ответственные за формирование основных максимумов и ступенек. Показано, что большинство переходов происходят вблизи плоскостей симметрии зоны Бриллюэна, но также имеется вклад и внутренних областей.

Список литературы

1. Ю П., Кардона М. Основы физики полупроводников. М.: Физматлит, 2002.

2. Gulans A., Kontur S., Meisenbichler C., et al. // J. Phys.: Condens. Matter. 2014. V. 26. P. 363202.

3. Jardine M.J.A., Dardzinski D., Yu M., et al. // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2023. V. 15. P. 16288.

УДК 535(06)+004(06)

А.Е. СУХАНОВ, В.В. ГАЛУЦКИЙ
Кубанский государственный университет, Краснодар

ОСОБЕННОСТИ МОДУЛЯЦИИ СИГНАЛА В ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОМ МОДУЛЯТОРЕ НА ОСНОВЕ ГРАДИЕНТНОГО КРИСТАЛЛА

Приведены результаты отношения разностей фаз для обыкновенной и необыкновенной волн. Было учтена особенность модуляции волн внутри различного температурного поля кристалла, а также распределения концентрации лития в кристалле ниобата лития. Результаты были получены, используя математическую модель в MatLab.

A.E. SUKHANOV, V.V. GALUTSKY
Kuban State University, Krasnodar

FEATURES OF SIGNAL MODULATION IN AN ELECTRO-OPTICAL MODULATOR BASED ON A GRADIENT CRYSTAL

The results of the ratio of phase differences for ordinary and extraordinary waves are presented. The peculiarity of wave modulation within different temperature fields of the crystal, as well as the distribution of lithium concentration in the lithium niobate crystal, was taken into account. The results were obtained using a mathematical model in MatLab.

На данный момент ниобат лития является ключевым материалом в фотонике, который активно используется в промышленности из-за его коммерческой доступности и физических свойств [1].

Целью работы является получение значений для отношения разностей фаз, с учётом модуляции сигнала внутри градиентного кристалла и оказывающего на него влияние температурного поля, путём математической модели, полученной в MatLab.

В зависимости от выбора концентрационного распределения (рис. 1) лития внутри кристалла оно будет оказывать влияние при прохождении сигнала внутри ниобата лития, так же как и температурное поле внутри кристалла [2]. Значения, полученные для исследования особенностей модуляции сигнала, с учётом вышеописанного, интерполировались в уравнение для разностей фаз для различных концентраций и температур в центре кристалла (рис. 2).

Наибольшую нестабильность показал параболический спадающий профиль, он проявил лучшие значения при мощности излучения 25, 35 и 15 Вт. Постоянный и линейный профили оказались приблизительно равны между собой, лучшие результаты были проявлены при 10, 30 и 15 Вт. Параболический профиль проявил наибольшую стабильность, его кривая не изменялась “скачкообразно” как у других профилей, минимальное отношение фаз было проявлено при мощностях: 25, 50 и 35 Вт. Значения выше были получены при температурах 30, 25 и 20 °C (рис. 3 и 4) соответственно.



Рис. 1. Концентрационные профили лития: постоянный (1), линейный нарастающий (2), параболический (3), параболический спадающий (4)

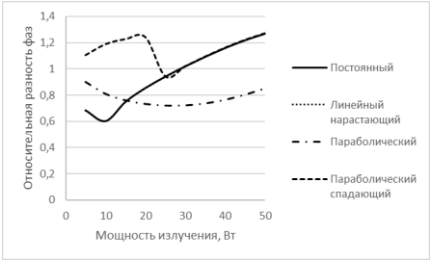


Рис. 2. Отношение разностей фаз при температуре внутри кристалла – 30 °C

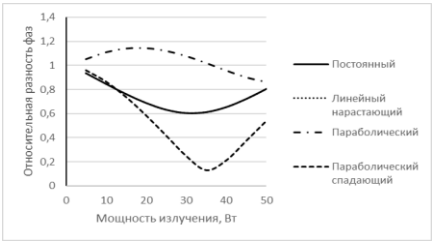


Рис. 3. Отношение разностей фаз при температуре внутри кристалла – 25 °C

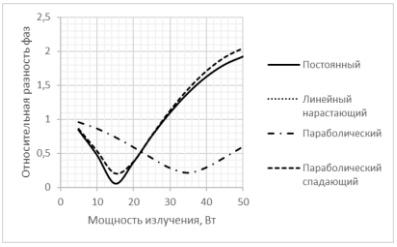


Рис. 4. Отношение разностей фаз при температуре внутри кристалла – 20 °C

Работа выполнена при поддержке проекта FZEN-2023-006

Список литературы

1. Bazzan M., Sada C. // Appl. Phys. Rev. 2015. V. 2. P. 040603.

2. Parravicini J., Safioui J., Degiorgio V., Minzioni P., Chauvet M. All-optical technique to measure the pyroelectric coefficient in electro-optic crystals // Journal of Applied Physics. 2011. V. 109, P. 033106.

УДК 535(06)+004(06)

С.М. КОСТРИЦКИЙ, В.А. ФЕДОРОВ, О.Г. СЕВОСТЬЯНОВ[1], И.М. ЧИРКОВА[1]
НПК Оптолинк, Зеленоград
[1]Кемеровский государственный университет

ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В КАНАЛЬНЫХ $Li_{1-x}H_xNbO_3$ ВОЛНОВОДАХ

Установлено, что электрооптические свойства волноводов зависят от их фазового состава, который изменяется модификацией процесса протонного обмена и пост обменного отжига. Фазовый состав волноводов определён на основе данных спектроскопии микроКРС. Полученные результаты позволили провести оптимизацию процесса изготовления модуляторов на основе канальных волноводов в кристаллах $LiNbO_3$.

S.M. KOSTRITSKII[1], V.A. FEDOROV, O.G. SEVOSTYANOV[2], I.M. CHIRKOVA[1]
RPC Optolink Ltd, Zelenograd
[1]Kemerovo State University

ELECTRO-OPTIC EFFECT IN CHANNEL $Li_{1-x}H_xNbO_3$ WAVEGUIDES

Electro-optical properties of the waveguides are found to be depending on their phase composition that may be changed intentionally by variation of technological conditions. The phase composition of waveguides was determined by micro-Raman spectroscopy. These experimental findings allowed for the optimization of technology for production of phase modulators based on channel waveguides in $LiNbO_3$ crystals.

В настоящее время, наибольшее применение в интегрально-оптических устройствах, использующих электрооптические (ЭО) кристаллы $LiNbO_3$, нашли канальные протонообменные (ПО) волноводы [1, 2]. Опубликованные ранее данные об ЭО-свойствах ПО-волноводов взаимно противоречивы. Эта проблема, по-видимому, связана с тем, что в этих исследованиях не учитывалось многообразие фаз $H_xLi_{1-x}NbO_3$. Методы ИК-спектроскопии широко используемые для анализа фазового состава планарных волноводов [2, 3] не позволяют определить фазовый состав канальных волноводов, из-за их малого размера (5 - 7 мкм). Поэтому, наиболее распространённым подходом является использование тестовых образцов планарных волноводов, изготавливаемых

одновременно с канальными интегрально-оптическими элементами, то есть тестовый образец и элемент помещались в один реактор при протонном обмене. При этом предполагалось, что канальный волновод имеет такой же фазовый состав $H_xLi_{1-x}NbO_3$, как и планарный тестовый образец. Однако в случае узких канальных ПО-волноводов, концентрация протонов *x* меньше, чем в планарных волноводах, и, поэтому, фазовые составы этих волноводов могут различаться [3]. Всё вышесказанное указывает на необходимость разработки неразрушающего метода для определения фазового состава и, следовательно [4], для оценки ЭО-коэффициентов в канальных ПО-волноводах. Для решения этой задачи мы использовали спектроскопию комбинационного рассеяния света (КРС), так как спектры КРС различных фаз $H_xLi_{1-x}NbO_3$ существенно различаются [4], а использование конфокального микроскопа в микроКРС спектрометре даёт высокое пространственное разрешение (≤ 1 мкм), достаточное для детального исследования канальных волноводов и интегрально-оптических схем изготовленных на их основе.

Для калибровки данных микроКРС, мы использовали образцы планарных волноводов, фазовый состав и ЭО-свойства которых были определены методами ИК- и УФ-спектроскопии [3, 4]. Это позволило установить чёткие корреляции между параметрами спектров микроКРС и значениями ЭО-коэффициентов, что было использовано для оптимизации условий изготовления фазовых ЭО-модуляторов на основе канальных ПО волноводов в $LiNbO_3$. Обнаружена зависимость ЭО-свойств волноводов от их фазового состава. Были исследованы разные ЭО модуляторы, содержащими волноводы с различным фазовым составом $H_xLi_{1-x}NbO_3$.

Использование спектроскопии микроКРС позволяет проведение экспресс анализа ЭО-свойств ПО-волноводов, так как отпадает необходимость проведения ряда сложных и трудоёмких технологических операций с интегрально-оптическими элементами, что требуется для проведения оптимизации технологии при использовании прямых измерений ЭО-эффективности волноводов.

Список литературы

1. Castaldini D, Bassi P, Tascu S, Aschieri P, De Micheli M.P., Baldi P. // J. Lightwave Technol. 2007. V. 25. P. 1588-1593.

2. Kostritskii S.M., Korkishko Yu.N., Fedorov V.A. // Proc. SPIE. 2013. V. 9065. P. 90650E.

3. Kostritskii S.M., Rodnov S.V., Korkishko Yu.N., Fedorov V.A., Sevostyanov O.G. // Ferroelectrics. 2012. V. 440. P. 47-56.

4. Кострицкий С.М., Коркишко Ю.Н., Федоров В.А., Севостьянов О.Г., Чиркова И.М., Митрохин В.П. // ЖПС. 2015. Т. 82. С. 240-246.

УДК 535(06)+004(06)

Е.Н. САВЧЕНКОВ, А.В. ДУБИКОВ, С.М. ШАНДАРОВ,
Н.И. БУРИМОВ, Д.Е. БЕЛЬСКАЯ, В.Я. ШУР[1],
А.Р. АХМАТХАНОВ[1], М.А. ЧУВАКОВА[1]
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
[1]Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина, Екатеринбург

ДИФРАКЦИЯ БРЭГГА ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО ГАУССОВА ПУЧКА НА РЕГУЛЯРНОЙ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЕ В КРИСТАЛЛЕ НИОБАТЕ ЛИТИЯ

Методом изотропной дифракции Брэгга на регулярной доменной структуре со 180-градусными стенками *y*-типа в кристалле 5 %MgO:$LiNbO_3$ экспериментально изучены зависимости её эффективности в первом и втором порядках от положения сфокусированного цилиндрической линзой зондирующего пучка с длиной волны 632,8 нм относительно граней Z^+ и Z^-.

E.N. SAVCHENKOV, A.V. DUBIKOV, S.M. SHANDAROV,
N.I. BURIMOV, D.E. BELSKAYA, V.Ya. SHUR[1],
A.R. AKHMATKHANOV[1], M.A. CHUVAKOVA[1]
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics
[1]Ural Federal University, Yekaterinburg

BRAGG DIFFRACTION OF AN ELLIPTICAL GAUSSIAN BEAM ON A REGULAR DOMAIN STRUCTURE IN A LITHIUM NIOBATE CRYSTAL

The dependences of the diffraction efficiency in the first and second orders of a probe light beam with a wavelength of 632.8 nm focused by a cylindrical lens on the different positions relative to the Z^+ and Z^- faces were experimentally studied by the Bragg isotropic diffraction method on a regular domain structure with 180-degree y-type walls in a 5%MgO:$LiNbO_3$ crystal

Особенности изотропной дифракция Брэгга зондирующего лазерного пучка с длиной волны $\lambda = 632{,}8$ нм и диаметром перетяжки ~300 мкм на регулярной доменной структуре (РДС) с наклонным стенками *y*-типа в кристалле 5 %MgO:$LiNbO_3$ были исследованы в [1]. Однако они соответствуют только положению луча вдоль оси *Z*, при котором наблюдается симметрия изображения вдоль данной оси в первом дифракционном максимуме. В настоящем сообщении представлены результаты экспериментального изучения зависимости эффективности

изотропной дифракции Брэгга на РДС такого же типа в максимумы первого и второго порядков, для зондирующего эллиптического гауссова пучка с размерами перетяжки 1600 × 25 мкм по осям X и Z соответственно, от её положения вдоль последней оси.

Исследуемая РДС с пространственным периодом $\Lambda = 7{,}29$ мкм была сформирована в кристалл 5% MgO:$LiNbO_3$ с размерами 5,9 × 4,05 × 1,06 мм^3 по осям X, Y и Z, соответственно, методом переключения поляризации во внешнем пространственно-периодическом электрическом поле. Зондирующий пучок от He-Ne лазера с выходной мощностью ~ 22 мВт, имеющий необыкновенную поляризацию, создаваемый с помощью системы из сферического и цилиндрического коллиматоров и положительной цилиндрической линзы с фокусным расстоянием $f = 95$ мм, имел перетяжку с плоским волновым фронтом, позиционируемую вдоль оси Y в середину кристалла с РДС ($y = d/2$). Кристалл смещался вдоль полярной оси Z микрометрической системой с шагом 25 мкм с регистрацией экспериментальной зависимости эффективности дифракции в первый и второй порядки. Результаты измерений представлены на рис. 1.

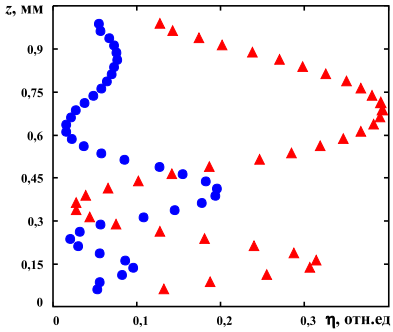


Рис. 1. Зависимости эффективности дифракции от положения зондирующего пучка вдоль оси Z кристалла, треугольники и круги – первый и второй порядки дифракции

Работа выполнена в рамках Госзадания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на 2023 - 2025 годы (задание FEWM-2023-0012).

Список литературы

1. Савченков Е.Н. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2019. Т. 110. С. 165.

УДК 535(06)+004(06)

А.В. КАДЕТОВА[1,2], О.В. ТОККО[1], А.И. ПРУССКИЙ[1],
М.Н. ПАЛАТНИКОВ[2]

[1]Петрозаводский государственный университет
[2]Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья Кольского научного центра РАН, Апатиты, Мурманская обл.

ВЛИЯНИЕ ДВОЙНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ НА СТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И КОНЦЕНТРАЦИЮ СОБСТВЕННЫХ ДЕФЕКТОВ В НИОБАТЕ ЛИТИЯ

Проведены структурные исследования кристаллов $LiNbO_3$:Zn:Mg, легированных методом твердофазного синтеза. Проанализировано изменение дефектного состояния и параметров элементарной ячейки.

A.V. KADETOVA[1,2], O.V. TOKKO[1], A.I. PRUSSKII[1],
M.N. PALATNIKOV[2]

[1]Petrozavodsk State University
[2]I.V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Material of Kola Science Center of the RAS, Apatity, Murmansk region

EFFECT OF DOUBLE DOPING ON STRUCTURAL CHARACTERISTICS AND CONCENTRATION OF INTRINSIC DEFECTS IN LITHIUM NIOBATE

XRD analysis of $LiNbO_3$:Zn:Mg crystals, doped by solid-phase synthesis, was carried out. The changes in the defect state and in the unit cell parameters of the studied crystals were analyzed.

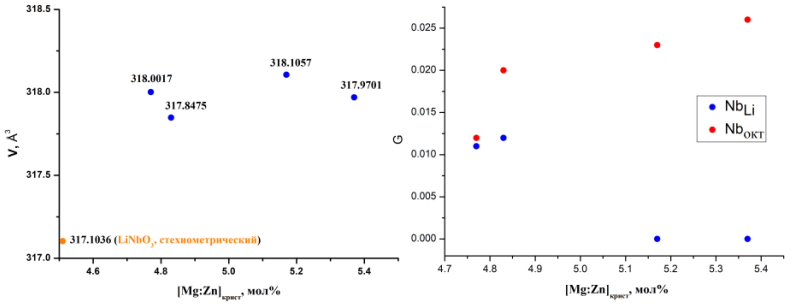
Легирование нефоторефрактивными примесями (Zn, Mg, Zr, In и другими) является одним из наиболее востребованных методов получения кристаллов ниобата лития ($LiNbO_3$), обладающих высокой стойкостью к оптическому повреждению [1, 2]. Собственные и примесные дефекты оказывают сильное влияние на фоторефрактивные свойства $LiNbO_3$ [2].

Целью данной работы был анализ изменения параметров элементарной ячейки и концентрации собственных дефектов (ниобия в позиции лития (Nb_{Li}) и ниобия в пустом кислородном октаэдре ($Nb_{окт}$)) в кристаллах $LiNbO_3$:Zn:Mg при увеличении концентрации примесей.

Исследуемые образцы $LiNbO_3$:Zn:Mg (3.57:1.20; 3.74:1.09; 4.02:1.15; 4.35:1.02 мол. %) предоставлены ИХТРЭМС КНЦ РАН. Кристаллы были

выращены методом Чохральского. Примеси в виде оксидов вводились непосредственно в шихту перед наплавлением тигля [3].

Структурные характеристики: периоды и объём (V) элементарной ячейки, координаты и коэффициенты заселённостей позиций (G) атомов основного мотива и дефектов были рассчитаны методом Ритвельда по данным порошковой дифракции. Рентгенограммы были получены на дифрактометре ДРОН-6 ($\lambda_{CuK\alpha}$ = 1.54178 Å). На рис. 1*а* видно, что легирование кристаллов приводит к увеличению объёма элементарной ячейки по сравнению с данными для стехиометрического кристалла.



а *б*

Рис. 1. Концентрационная зависимость объёма элементарной ячейки (*а*); концентрационная зависимость количества точечных дефектов (Nb_{Li}, $Nb_{окт}$) (*б*)

С увеличением концентрации примесей уменьшается количество дефектов Nb_{Li} (рис. 1*б*), что согласуется с литературными данными. Уменьшение количества Nb_{Li} в кристаллах $LiNbO_3$:Mg, Zn связывают с уменьшением фоторефракции [4]. Однако в исследуемых образцах количество дефектов $Nb_{окт}$ возрастает при увеличении концентрации примесей. Дефекты приводят к разупорядочению катионной подрешётки и могут играть разную роль при формировании оптических свойств.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-22-20114 (https://rscf.ru/project/22-22-20114/), проводимого совместно с Республикой Карелия с финансированием из Фонда венчурных инвестиций Республики Карелия (ФВИ РК).

Список литературы

1. Sánchez-Dena O., et al. // Crystals. 2020. V. 10. P. 990.
2. Volk T., Wöhlecke M. Lithium niobate. Defects, photorefraction and ferroelectric switching, 1st ed. Berlin: Springer, 2009.
3. Маслобоева С.М. и др. // Журнал неорганической химии. 2011. V. 56 (8). С. 1264-1268.
4. Черная Т.С. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2001. Т. 73 (2). С. 110-113.

Л.А. БОБРЕВА, Н.В. СИДОРОВ, М.Н. ПАЛАТНИКОВ,
А.Ю. ПЯТЫШЕВ[1]
Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья Кольского научного центра РАН, Апатиты, Мурманская обл.
[1]Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

ОСОБЕННОСТИ ДЕФЕКТНОЙ СТРУКТУРЫ МОНОКРИСТАЛЛОВ $LiNbO_3$:Tb

По спектрам КР второго порядка и спектрам ИК-поглощения в области валентных колебаний водородных связей выполнены исследования состояния дефектности кристаллов $LiNbO_3$:Tb. Обнаружены существенные изменения в спектрах при увеличении концентрации легирующих ионов тербия в кристалле до концентрационного порога при 2.21 мас. %, которые интерпретированы как проявление связанных состояний оптических фононов, в образовании которых определенную роль могут играть кластеризация атомов в структуре кристалла, а также особенности локализации атомов водорода.

L.A. BOBREVA, N.V. SIDOROV, M.N. PALATNIKOV,
A.Yu. PYATYSHEV[1]
I.V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Material of Kola Science Center of the RAS, Apatity, Murmansk region
[1]Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

FEATURES OF DEFECT STRUCTURE OF SINGLE CRYSTALS $LiNbO_3$:Tb

The defectivity state of $LiNbO_3$:Tb crystals has been investigated by second-order Raman spectra and IR absorption spectra in the valence vibration region of hydrogen bonds. Significant changes in the spectra were found when increasing the concentration of doping terbium ions in the crystal up to the concentration threshold at 2.21 wt. %, which are interpreted as manifestation of bound states of optical phonons, in the formation of which clustering of atoms in the crystal structure, as well as features of localization of hydrogen atoms may play a role.

В последнее время, как перспективные оптические материалы различного назначения, активно изучаются легированные редкоземельными элементами монокристаллы и керамики ниобата и танталата лития ($LiNbO_3$ и $LiTaO_3$) [1, 2]. На основе монокристаллов $LiNbO_3$:Tb возможно создание лазеров непрерывного действия с излучением в синей области спектра [3]. В связи с этим актуальным

является исследование тонких особенностей структуры и состояния дефектности кристаллов $LiNbO_3$:Tb, с низкой концентрацией ионов Tb^{3+} в диапазоне 0.1 - 2.21 мас. %, как наиболее структурно высокосовершенных и оптически высококачественных материалов.

В работе впервые обнаружено изменение вида спектра КР второго порядка в диапазоне частот 1000 - 2000 $см^{-1}$ и вида ИК-спектра поглощения в диапазоне частот 3100 - 3700 $см^{-1}$ при возрастании концентрации ионов Tb^{3+} в кристалле $LiNbO_3$:Tb. Обнаруженные изменения в спектре КР интерпретированы как проявление связанных состояний оптических фононов. При этом показано, что в формировании связанных состояний оптических фононов определенную роль могут играть, структурные дефекты, обусловленные особенностями локализации атомов водорода в структуре кристалла. По спектрам ИК-поглощения в области валентных колебаний OH^--групп показано, что появление полос поглощения с частотами 3470, 3483 и 3486 $см^{-1}$ связано с нарушением стехиометрии (величины Li/Nb) в матрице кристалле и образованием комплексных дефектов V_{Li}-OH. В ИК-спектре поглощения кристаллов $LiNbO_3$:Tb (0.1, 0.48 и 2.21 мас. %) обнаружено меньше, чем в конгруэнтном кристалле $LiNbO_3$, полос поглощения, отвечающих валентным колебаниям водородных связей. Этот факт объяснён в два раза меньшей (по сравнению с номинально чистым конгруэнтным кристаллом) концентрацией в кристаллах $LiNbO_3$:Tb литиевых вакансий, вследствие наличия точечных дефектов Tb_{Li}. Показано, что уменьшение количества точечных дефектов в виде литиевых вакансий и увеличение примесных дефектных центров Tb_{Li}. приводит к появлению комплексного дефекта Tb_{Li}-OH, которому на ИК-спектре соответствует полоса поглощения с частотой 3493 $см^{-1}$. Появление полос поглощения с частотами в диапазонах 3100 - 3403 и 3510 - 3580 $см^{-1}$ объяснено формированием в структуре легированных кристаллов кислородно-октаэдрических кластеров, в которых позиционная симметрия легирующего катионов Tb^{3+} - C_1.

Список литературы

1. Yang X., Lin S., et al. // Ceramics International. 2020. V. 46. P. 1178-1182.

2. He K., Shen Y., et al. // Optical Materials. 2021. V. 112. P. 1-7.

3. Ryba-Romanowski W., Gołab S., et al. // Applied Physics Letters. 2001. V. 78, P. 3610-3611.

УДК 535(06)+004(06)

А.А. КОЗЛОВ[1,2], Д.Н. МОСКАЛЕВ[1,2], В.А. ЖУРАВЛЕВ[1,2],
У.О. САЛГАЕВА[2], В.В. КРИШТОП[1,2,3], А.Б. ВОЛЫНЦЕВ[2]
[1]Пермская научно-производственная приборостроительная компания
[2]Пермский государственный национальный исследовательский университет
[3]Пермский национальный исследовательский политехнический университет

ПРОФИЛЬ СКОРОСТИ ИОННОГО ТРАВЛЕНИЯ ТОНКОПЛЁНОЧНОГО НИОБАТА ЛИТИЯ ПО ГЛУБИНЕ

Приведены результаты экспериментов по исследованию зависимости скорости ионного травления тонкоплёночного ниобата лития по глубине. Показано, что скорость ионного травления не является постоянной величиной и растёт при удалении приповерхностных слоёв тонкой плёнки.

A.A. KOZLOV[1,2], D.N. MOSKALEV[1,2], V.A. ZHURAVLEV[1,2],
U.O. SALGAEVA[2], V.V. KRISHTOP[1,2,3], A.B. VOLYNTSEV[2]
[1]Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company
[2]Perm National Research State University
[3]Perm National Research Polytechnic University

DEPTH PROFILE OF ION-SPUTTERING RATE OF THIN FILM LITHIUM NIOBATE

The ion-sputtering rate depth profiles of thin film lithium niobate are presented. It was shown that ion-sputtering rate is not a constant and increases with the removal of near-surface layers of a thin film of lithium niobate.

Тонкоплёночный ниобат лития (НЛ) является перспективным материалом для создания фотонных интегральных схем (ФИС) с высокими скоростями управления. Для формирования канальных волноводов ФИС используются два метода плазменного травления – реактивное ионное травление [1] либо ионное травление в инертных газах [2]. При ионном травлении тонкоплёночного НЛ наблюдается не постоянная скорость распыления, которая затрудняет прецизионное ионное травление на заданную глубину для формирования профиля волновода неполного травления (shallow waveguides).

Целью работы является экспериментальное исследование профиля скорости ионного травления тонкоплёночного НЛ X-среза (NanoLN, d_{LiNbO_3} = 700 нм) по глубине в среде Ar. Травление образцов производилось в установке ICP/RIE плазмы при режиме W_{ICP} = 500 Вт, W_{RIE} = 100 Вт

(120 Вт), p = 0.005 мбар, поток Ar = 20 sccm. Травление производилось интервалами по 5 мин. Скорость ионного травления вычислялась по измеренным толщинам плёнки НЛ при помощи спектрального рефлектометра. Ионное травление производилось до остаточной толщины плёнки $d_{ост.}$ = 100 нм. На рис. 1 приведён профиль скорости ионного травления тонкоплёночного НЛ по глубине. Экспериментально наблюдается рост скорости ионного травления при постепенном удалении приповерхностных слоёв до глубин ~ 300 нм. Такое поведение, вероятно, связано с дефектностью приповерхностных слоёв после ионной имплантации (метод изготовления подложек – SmartCut) [3]. После изготовления слои имеют распределение дефектов микроструктуры (в том числе дислокационные петли) близкое к гауссовому (рис. 2).

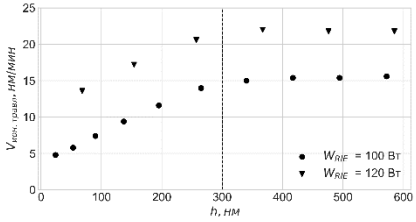


Рис. 1. Профиль скорости ионного травления по глубине

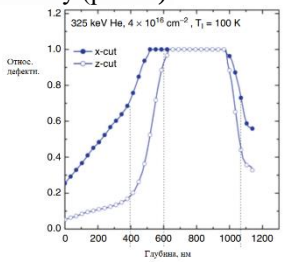


Рис. 2. Распределение дефектов структуры НЛ по глубине (отн.ед. 1.0 – аморфное состояние) [3]

По Г. Францу коэффициент ионного распыления (sputtering yield), согласно теории каскадных столкновений, описывается выражением $S \sim \gamma E_{кин}/U_0$, где γ – приведённая масса иона и распыляемого материала, $E_{кин}$ – кинетическая энергия падающих ионов, U_0 – поверхностная энергия [4]. Поверхность подложек имеет наибольшую остаточную дефектность (наибольшую поверхностную энергию), по глубине происходит уменьшение плотности дефектов, что приводит к повышению коэффициента распыления. Сигмоидальная форма кривой на рис. 1. коррелирует с близкой к гауссовой зависимостью плотности дефектов по глубине (рис. 2). Данное экспериментальное наблюдение является крайне важным при разработке процесса ионного травления тонкоплёночного НЛ для задач разработки техпроцессов производства ФИС.

Список литературы

1. Kozlov A.A., Moskalev D.N., et al. // Applied Sciences. 2023. V. 13 (4). P. 2097.
2. Kaufmann F., et al. // Nanophotonics. 2023. V. 13 (8). P. 1601-1611.
3. Jia Y., et al. // Applied Physics Reviews. 2021. V. 8 (1).
4. Franz G. Low pressure plasmas and microstructuring technology. Springer, 2009.

Р.А. ТИТОВ, М.В. СМИРНОВ, Л.А. БОБРЕВА,
Н.А. ТЕПЛЯКОВА, Н.В. СИДОРОВ, М.Н. ПАЛАТНИКОВ
Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья Кольского научного центра РАН, Апатиты, Мурманская обл.

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МОНОКРИСТАЛЛОВ $LiNbO_3$:Zn:Mg, ПОЛУЧЕННЫХ ПО РАЗНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ

Нелинейно-оптические кристаллы $LiNbO_3$:Zn:Mg (3.45 мол. % Zn и 1.41 мол. % Mg) и $LiNbO_3$:Zn:Mg (3.45 мол. % Zn и 1.22 мол. % Mg), полученные методом гомогенного и прямого легирования, характеризуются низким эффектом фоторефракции, согласно методу фотоиндуцированного рассеяния света (ФИРС). Методом лазерной коноскопии установлено, что технология гомогенного легирования позволяет получить кристаллы более высокого оптического качества.

R.A. TITOV, M.V. SMIRNOV, L.A. BOBREVA,
N.A. TEPLYAKOVA, N.V. SIDOROV, M.N. PALATNIKOV
I.V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Material of Kola Science Center of the RAS, Apatity, Murmansk region

COMPARATIVE STUDIES OF THE OPTICAL PROPERTIES OF $LiNbO_3$:Zn:Mg SINGLE CRYSTALS OBTAINED BY DIFFERENT TECHNOLOGIES

According to the photoinduced light scattering (PILS) method nonlinear optical $LiNbO_3$:Zn:Mg (3.45 mol. % Zn, 1.41 mol. % Mg) and $LiNbO_3$:Zn:Mg (3.45 mol. % Zn, 1.22 mol.% Mg) crystals obtained by homogeneous and direct doping technologies had a low photorefractive effect. The laser conoscopy method showed that the crystal obtained by homogeneous doping technology were a high optical quality.

Получение новых функциональных оптических материалов на основе нелинейно-оптического монокристалла ниобата лития ($LiNbO_3$) является чрезвычайно актуальной задачей. Однако несмотря на огромный потенциал применения кристалла $LiNbO_3$, его использование для различных оптических приложений ограничено проявлением эффекта фоторефракции и особенностями разупорядочения структурных единиц кристалла, существенно зависящих от стехиометрии (R = [Li] / [Nb]), типа и концентрации собственных и примесных дефектов, а также технологий получения шихты и монокристаллов [1 - 3]. Известно, что солегирование

кристалла $LiNbO_3$ двумя «нефоторефрактивными» примесями может оказывать более тонкое воздействие на его сопротивление оптическому повреждению лазерным излучением и нелинейно-оптические свойства [4].

В данной работе методами фотоиндуцированного рассеяния света и лазерной коноскопии были выполнены исследования оптических свойств кристаллов $LiNbO_3$:Zn:Mg (3.45 мол. % Zn и 1.41 мол. % Mg) и $LiNbO_3$:Zn:Mg (3.45 мол. % Zn и 1.22 мол. % Mg), полученных методами гомогенного и прямого легирования, соответственно. Далее – кристаллы LN(1) и LN(2). Из рис. 1*а*, *б* видно, что для обоих кристаллов индикатриса ФИРС не раскрывается, а наблюдается только круговое рассеяние на статических структурных дефектах, что свидетельствует о низком эффекте фоторефракции. Коноскопическая картина кристалла LN(2) несколько более неоднородная по сравнению с коноскопической картиной кристалла LN(1): на верхней левой ветви «мальтийского креста» имеются аномалии в виде попарного смыкания первых трёх изохром (рис. 1*в*, *г*).

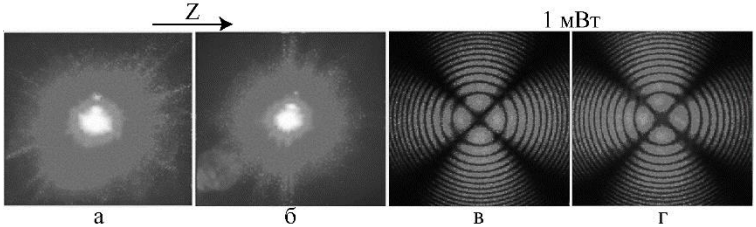


Рис. 1. Картины ФИРС (*а*, *б*), зарегистрированные через одну минуту эксперимента при мощности лазерного излучения 160 мВт, и коноскопические картины (*в*, *г*) кристаллов: LN(1) – (*а*, *в*); LN(2) – (*б*, *г*)

Таким образом, проведённый анализ оптических свойств кристаллов LN(1) и LN(2) разного генезиса свидетельствует о том, что для обоих кристаллов отсутствует эффект фоторефракции, при этом кристалл LN(1) обладает более высоким оптическим качеством.

Работа выполнена при финансовой поддержке правительства Мурманской области научно-исследовательских проектов молодых учёных (№ 201 от 27 ноября 2023 г.).

Список литературы

1. Сидоров Н.В., Волк Т.Р. и др. Ниобат лития: дефекты, фоторефракция, колебательный спектр, поляритоны. М.: Наука, 2003.

2. Палатников М.Н., Сидоров Н.В. и др. Фундаментальные аспекты технологии сильно легированных кристаллов ниобата лития. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2017.

3. Сидоров Н.В., Палатников М.Н. и др. Монокристаллы ниобата и танталата лития разного состава и генезиса. М.: РАН, 2022.

4. Kasemir K., Betzler K., et al. // J. Appl. Phys. 1998. V. 84. No. 9. P. 5191-5193.

УДК 535(06)+004(06)

М.Ф. УМАРОВ
Вологодский государственный университет

АНАЛИЗ СПЕКТРОВ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ БИОАКТИВНЫХ ПРЕПАРАТОВ

Разработана методика идентификации биоактивных препаратов по производителям на примере фармацевтических объектов: аспирина, цитрамона, анальгина и парацетамола. Методика основана на волоконно-оптической регистрации спектров фотолюминесценции с использованием малогабаритного спектрометра и системы обработки данных, позволяющей провести сравнение анализируемого спектра со спектром эталонного вещества.

M.F. UMAROV
Vologda State University

ANALYSIS OF PHOTOLUMINESCENCE SPECTRA FOR RECOGNITION OF BIOACTIVE DRUGS

A method for identifying bioactive drugs by manufacturers has been developed using the example of pharmaceutical objects: aspirin, citramon, analgesic and paracetamol. The technique is based on fiber-optic registration of photoluminescence spectra using a small-sized spectrometer and a data processing system that allows comparison of the analyzed spectrum with the spectrum of the reference substance.

В настоящее время для всех стран мира, в том числе, в России очень актуальна проблема фальсификации биоактивных препаратов, представляющая собой угрозу для большой части населения. В связи с этим существует необходимость проверки качества биоактивных препаратов различными методами. Среди анализируемых методов более перспективным и надежным является флуоресцентная спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС).

Целью данной работы явилось сравнения спектров фотолюминесценции и коэффициентов корреляции анализируемых и номинальных биоактивных препаратов на примере коммерческих фармацевтических препаратов, различных производителей. В качестве объектов исследования нами были выбраны типичные фармацевтические препараты (цитрамон, анальгин, аспирин и парацетамол).

Как известно, в структуре всех исследуемых веществ, присутствуют ароматические кольца, что приводит к фундаментальному электронному

поглощению этих соединений в среднем ультрафиолетовом диапазоне. Соответственно в этих веществах наблюдается фотолюминесценция в фиолетово-красном диапазоне при возбуждении образцов коротковолновым (266 нм) электромагнитным излучением.

На рис. 1 представлена схема установки с контактной волоконно-оптической регистрацией спектров вторичного излучения с двухканальным зондом. В качестве источника возбуждающего ультрафиолетового излучения использовалась четвёртая гармоника (266 нм) лазера на алюмоиттриевом гранате В данном случае лазерное излучение 1 через оптический зонд 2 по одноканальному световоду 3 передавалось к исследуемому образцу 4. Вторичное излучение от исследуемого образца по другому одноканальному световоду 3 поступало на вход абсорбционного фильтра 5, затем к миниспектрометру 6 и управляемому компьютеру 7. После компьютерной обработки были построены графики флуоресцентных спектров исследуемых веществ, которые приведены на рис. 2.

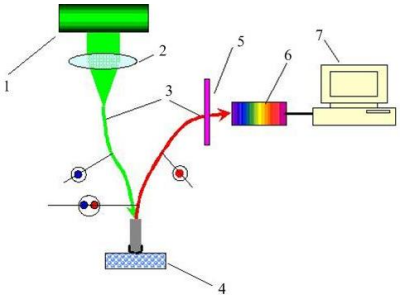


Рис. 1. Схема контактной регистрации флуоресцентных спектров вторичного излучения с двухканальным зондом (1 – лазерное излучение; 2 – оптический зонд; 3 – одноканальные световоды; 4 – исследуемый образец; 5 – абсорбционный фильтр; 6 – миниспектрометр; 7 – управляемый компьютер)

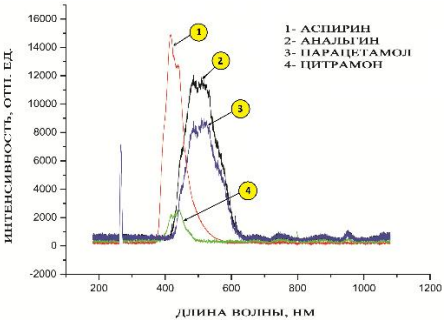


Рис. 2. Фотолюминесцентные спектры лекарственных препаратов (1 – анальгин; 2 – цитрамон; 3 – парацетамол; 4 – аспирин)

В результате нами установлено, что предлагаемый метод позволяет идентифицировать фармацевтические препараты по производителям.

УДК 535(06)+004(06)

А.О. НАБИЛКОВА, М.С. ГУСЕЛЬНИКОВ, Е.Н. ОПАРИН,
М.В. МЕЛЬНИК, А.Н. ЦЫПКИН, С.А. КОЗЛОВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ БИСТАБИЛЬНОСТИ ПРОПУСКАНИЯ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОГО ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫМ «БЕЗЗЕРКАЛЬНЫМ» ИНТЕРФЕРОМЕТРОМ ФАБРИ–ПЕРО НА ОСНОВЕ $LiNbO_3$

Проанализированы характеристики бистабильного пропускания «беззеркального» интерферометра Фабри–Перо с рабочей средой, обладающей экстремально большой и малоинерционной нелинейностью показателя преломления в терагерцовом (ТГц) спектральном диапазоне. Экспериментально и аналитически показано, что при использовании кристалла $LiNbO_3$ в качестве рабочей среды нелинейного интерферометра в кривой пропускания интерферометра наблюдается оптический гистерезис при интенсивностях входного излучения с центральной частотой 0,25 ТГц менее 3,5 Вт/см^2.

A.O. NABILKOVA, M.S. GUSELNIKOV, E.N. OPARIN,
M.V. MELNIK, A.N. TSYPKIN, S.A. KOZLOV
ITMO University, Saint-Petersburg

INVESTIGATION OF TRANSMISSION BISTABILITY OF HIGH-INTENSE TERAHERTZ RADIATION BY A NONLINEAR “MIRRORLESS” FABRY–PEROT INTERFEROMETER BASED ON $LiNbO_3$

This report analyzes the bistability features of a «mirrowless» Fabry–Perot interferometer with a medium possessing highly nonlinear refractive index and low inertia. The investigation demonstrates, through modelling and experimental inquiry, that employing a nonlinear $LiNbO_3$ crystal as medium result in discernible optical hysteresis, under input intensities of up to 3.5 W/cm^2 at a frequency of 0.25 THz.

В стремлении к достижению высокой скорости передачи оптических сигналов и меньшего энергопотребления за счёт замены электрических схем только оптическими стали быстро развиваться схемы оптических устройств для оптических квантовых компьютеров [1]. Ключевой особенностью этих устройств является оптическая бистабильность, для наблюдения которой обычно используются резонатор и нелинейная среда [2]. Создание сверхбыстрых устройств для индустриальной фотоники

упрощается в терагерцовом диапазоне за счёт обнаруженной в 2015 году гигантской нелинейности [3], позволяющей наблюдать оптическую бистабильность на менее низких мощностях [4, 5].

Пропускание высокоинтенсивного терагерцового (ТГц) излучения кристаллом $LiNbO_3$ с большим линейным и нелинейным показателями преломления ($n = 6$ и $n_2 = 3.5\ W/cm^2$) при увеличении интенсивности входного излучения от 1,2 до 3 Вт/см^2 и в обратном направлении было измерено на гиротроне со следующими параметрами излучения: частота 250 ГГц, мощность 100 - 300 кВт, длительность импульса 40 мкс. Для данного источника существует система зеркал, обеспечивающая формирование перетяжки излучения диаметром порядка 4 мм; в точке фокуса интенсивность доходила до значения 3,5 Вт/см^2. Экспериментально зафиксированный при данных параметрах установки оптический гистерезис показан на рис. 1, где «ширина» петли гистерезиса обусловлена термическим эффектом. Результаты аналитического моделирования для данных параметров показаны на рис. 2. Полученные результаты демонстрируют возможность использования «беззеркальных» интерферометров Фабри–Перо в терагерцовом диапазоне частот в качестве оптических логических элементов.

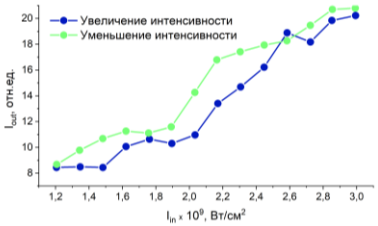


Рис. 1. Аналитическая кривая оптического гистерезиса

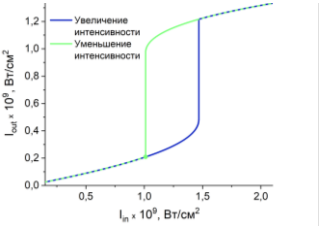


Рис. 2. Экспериментальные кривые оптического гистерезиса

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 24-22-00084.

Список литературы

1. Minzioni P., et al. // Journal of Optics. 2019. V. 21. No. 6. P. 063001.
2. McCall S.L., et al. // Journal of the Optical Society of America. 1975. V. 65. P. 1184.
3. Dolgaleva K., et al. // Physical Review A. 2015. V. 92. No. 2. P. 023809.
4. Buyanovskaya E., et al. // Journal of Physics. 2014. V. 541. No. 1. P. 012068.
5. Jiang L., et al. // Optical Materials Express. 2019. V. 9. No. 1. P. 139-150.

М.В. СМИРНОВ, Н.В. СИДОРОВ, М.Н. ПАЛАТНИКОВ,
О.Б. ЩЕРБИНА, В.Б. ПИКУЛЕВ[1]
Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья Кольского научного центра РАН, Апатиты, Мурманская обл.
[1]Петрозаводский государственный университет

ПРОЯВЛЕНИЕ ФОТОИНДУЦИРОВАННЫХ ЭФФЕКТОВ В СПЕКТРАХ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ КРИСТАЛЛА И КЕРАМИКИ НИОБАТА ЛИТИЯ

Исследовано влияние УФ-излучения на спектры фотолюминесценции кристалла и керамики ниобата лития конгруэнтного состава.

M.V. SMIRNOV, N.V. SIDOROV, M.N. PALATNIKOV,
O.B. SHCHERBINA, V.B. PIKULEV[1]
I.V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Material of Kola Science Center of the RAS, Apatity, Murmansk region
[1]Petrozavodsk State University

THE APPEARANCE OF PHOTO-INDUCED EFFECTS IN PHOTOLUMINESCENCE SPECTRA OF LITHIUM NIOBATE CRYSTAL AND CERAMICS

The influence of UV radiation on photoluminescence spectra of congruent lithium niobate crystal and ceramics was investigated.

Функциональные элементы на основе сегнетоэлектрического кристалла $LiNbO_3$ широко используются в устройствах нелинейной и квантовой оптики, электронной техники. Взаимодействие лазерного излучения с кристаллом $LiNbO_3$ приводит к появлению в кристалле фотоиндуцированных эффектов (фоторефракции, фотонапряжения, спонтанной люминесценции и других), существенно влияющих на его физические характеристики [1]. Целью данной работы было сравнительное изучение люминесценции, возникающей под действием УФ лазерного излучения, в кристалле и в керамике $LiNbO_3$ конгруэнтного состава (R = [Li] / [Nb] = 0.946), на основе которых в промышленности изготавливаются многие оптические функциональные элементы.

Получение монокристалла методом Чохральского и керамики методом высокотемпературного синтеза описаны в работах [1, 2]. Спектры

фотолюминесценции ($\lambda = 380 \div 700$ нм) регистрировались с помощью спектрографа SOL SL-100M с ПЗС-детектором FLI ML 1107 BlackIlluminated (Hamamatsu). Возбуждение люминесценции осуществлялось непрерывным He-Cd лазером ($\lambda_{возб} = 325$ нм, 15 мВт).

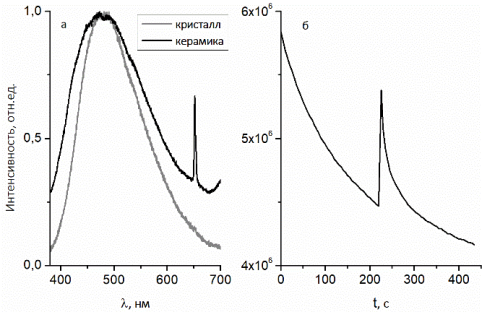


Рис. 1. Нормированные спектры фотолюминесценции (*а*) исследуемых образцов. Кинетика затухания фотолюминесценции керамического образца (*б*)

Широкая полоса люминесценции при 500 нм для кристалла и керамики $LiNbO_{3конг}$ имеет общую природу и обусловлена, в основном, электронно-дырочной рекомбинацией между Nb и O, рис. 1*а*. Причём, для кристалла эта полоса у́же вследствие меньшего разупорядочения структурных единиц кристаллической решётки. Интенсивность фотолюминесценции керамического образца со временем уменьшается, рис. 1*б*, что может быть обусловлено наличием фотовольтаического эффекта. При однородном освещении лазерным излучением в $LiNbO_3$ вдоль полярной оси возникает ток, который в керамике приводит к накоплению фотовозбуждённых носителей заряда на границах зёрен. Именно на границах расположено большое количество различных дефектов, через которые происходит безызлучательная релаксация носителей заряда, и фотолюминесценция уменьшается. После снятия возбуждения происходит постепенное восстановление эмиссионной способности в течение пятнадцати минут, и при повторном воздействии УФ-излучения интенсивность люминесценции в первоначальный момент времени стремится к исходному значению (скачок кривой на рис. 1*б*) и процесс повторяется. Таким образом, в керамике наблюдается лазерное тушение центров свечения NbO_6, формирующихся на границах зёрен.

Список литературы

1. Palatnikov M.N., Birukova I.V., et al. // Journal of Crystal Grown. 2014. V. 386. P. 113-118.

2. Палатников М.Н., Сидоров Н.В., Калинников В.Т. Сегнетоэлектрические твердые растворы на основе оксидных соединений ниобия и тантала. СПб: Наука. 2002.

О.В. ТОККО[1], А.В. КАДЕТОВА[1,2], С.В. ПЕТРОВА[1],
М.Н. ПАЛАТНИКОВ[2], Н.А. ТЕПЛЯКОВА[2]
[1]Петрозаводский государственный университет
[2]Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья Кольского научного центра РАН, Апатиты, Мурманская обл.

ДЕФЕКТНАЯ СТРУКТУРА И ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРИСТАЛЛОВ НИОБАТА ЛИТИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО ЦЕРИЕМ

Кристаллы $LiNbO_3$:Ce, выращенные методом Чохральского в широком диапазоне концентраций примеси [Ce] = 0.12 – 0.88 масс. %, были исследованы методами фотоиндуцированного рассеяния света, лазерной коноскопии и рентгеноструктурного анализа. В области концентраций примеси [Ce] ≈ 0.8 – 0.88 масс. % обнаружены выраженные пороговые эффекты.

O.V. TOKKO[1], A.V. KADETOVA[1,2], S.V. PETROVA[1],
M.N. PALATNIKOV[2], N.A. TEPLYAKOVA[2]
[1]Petrozavodsk State University
[2]I.V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Material of Kola Science Center of the RAS, Apatity, Murmansk region

DEFECT STRUCTURE AND OPTICAL CHARACTERISTICS OF LITHIUM NIOBATE CRYSTALS DOPED WITH CERIUM

$LiNbO_3$:Ce crystals grown by the Czochralski method in a wide range of dopant concentrations [Ce] = 0.12 - 0.88 wt %, were studied using photoinduced light scattering, laser conoscopy and X-ray diffraction analysis. In the region of dopant concentration [Ce] ≈ 0.8 - 0.88 wt %, pronounced threshold effects were found.

Ниобат лития – широко известный многофункциональный материал с пьезоэлектрическими, ферроэлектрическими, нелинейно-оптическими и фоторефрактивными свойствами, что делает его широко используемым в оптике [1, 2]. Для улучшения фоторефрактивных свойств, в кристаллы добавляют различные примеси, включая церий. Однако добавка церия может повлиять на оптическую прозрачность и электрооптические свойства материала [3].

Целью данной работы является исследование серии кристаллов $LiNbO_3$:Ce с концентрацией церия 0.12 - 0.88 масс. % Актуальность обусловлена возможностью расширения области практических

приложений данных кристаллов как «чёрного» ниобата лития – свободного от пироэффекта температурно-независимого акустоэлектронного материала [4]. Модели расположения собственных и примесных дефектов были установлены методом полнопрофильного анализа рентгенограмм. Рентгенограммы были получены на дифрактометре ДРОН-6 ($\lambda_{CuK\alpha}$ = 1.54178 Å). Эксперименты по ФИРС и лазерной коноскопии проводились с использованием Nd:YAG-лазера, λ_0 = 532 нм, I до ~ 6.29 Вт/см^2.

Результаты исследования физико-химических и структурных характеристик показали наличие концентрационного порога в кристаллах $LiNbO_3$:Ce в области концентраций примеси [Ce] ≈ 0.8 - 0.88 масс. %.

Методами рентгеноструктурного анализа показано, что во всех исследуемых образцах церий занимает позицию лития. Дефекты Nb_{Li} и Ce_{Li} смещаются из регулярной позиции лития в одном направлении, что будет вносить схожий вклад в изменение сегнетоэлектрических свойств. Образцы с высокой концентрацией церия в кристалле (0.8 и 0.88 масс. %) имеют наибольшее количество дефектов типа ниобий в пустом октаэдре $Nb_□$ и наиболее заметные искажения октаэдров $Nb_{Li}O_6$ и $Ce_{Li}O_6$. В образце с минимальной концентрацией церия (0.12 масс. %) количество дефектов типа $Nb_□$ в два раза меньше, он имеет менее развитую дефектную структуру (рис. 1) по сравнению с другими образцами $LiNbO_3$:Ce.

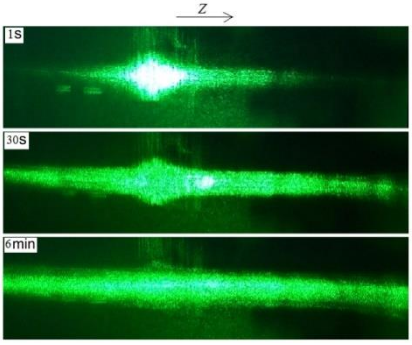


Рис. 1. Картина ФИРС кристалла $LiNbO_3$:Ce (0.12 масс. %)

Исследование данных кристаллов методом ФИРС показало, что легирование церием усиливает фоторефрактивные свойства. В кристалле $LiNbO_3$:Ce ([Ce] = 0.12 масс. %) раскрытие индикатрисы ФИРС происходит уже в первые секунды облучения, угол раскрытия индикатрисы > 60 °. Оптическая однородность кристаллов $LiNbO_3$:Ce ([Ce] = 0.12 и 0.4 масс. %) выше по сравнению со $LiNbO_{3стех}$.

Список литературы

1. Minzioni P., Cristiani I., et al. Pavia: Dipartimento di Elettronica, Università di Pavia, 2007.
2. Steckman G.J., Pu A., Psaltis D. // Appl. Opt. 2001. V. 40 (20). P. 3387.
3. Rakhmatullin R.M., Pavlov V.V., et al. // J. Exp. Theor. Phys. 2015. V. 121 (5). P. 869.
4. Jen S., Bobkowski R. // Proc. of IEEE Ultrasonics Symposium. 2000. P. 269.

УДК 535(06)+004(06)

А.О. НАБИЛКОВА, М.В. МЕЛЬНИК, А.О. ИСМАГИЛОВ,
И.Р. АРЦЕР, А.Н. ЦЫПКИН, С.А. КОЗЛОВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД Z-СКАНИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИГАНТСКИХ НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

В работе впервые используется метод eclipse z-сканирования для измерения оптической нелинейности кристалла $LiNbO_3$ в терагерцовом (ТГц) диапазоне. Для повышения чувствительности на порядок в сравнении с классическим методом z-сканирования в эксперименте используется апертура в виде диска. Измеренный показатель нелинейного преломления кристалла $LiNbO_3$ составляет $2{,}5 \times 10^{-11}$ см^2/Вт.

A.O. NABILKOVA, M.V. MELNIK, A.O. ISMAGILOV,
I.R. ARTSER, A.N. TSYPKIN, S.A. KOZLOV
ITMO University, Saint-Petersburg

MODIFIED Z-SCAN METHOD FOR STUDYING GIANT NONLINEARIES IN THE TERAHERTZ FREQUENCY RANGE

This study represents the first application of the eclipse z-scan technique to study the optical nonlinearity of a $LiNbO^3$ crystal in the terahertz range. In order to enhance order sensitivity, in reference to the classical z-scan method, a disk as an aperture is implemented in the experimental setup. The obtained value for the nonlinear refractive index of the $LiNbO_3$ crystal stands at $2{,}5 \times 10^{-11}$ cm^2/W.

Используемый в работе метод eclipse z-сканирования [1] представляет собой модификацию классического метода z-сканирования для характеристики оптической нелинейности третьего порядка материалов, в частности жидкостей и кристаллов [2]. Этот метод увеличивает чувствительность системы на порядок путём блокирования центральной области луча и наблюдения только за его внешними краями с помощью дисковой апертуры.

В качестве источника терагерцового излучения был использован TERA-AX (Avesta Project). В данной системе генерация терагерцового (ТГц) излучения основана на оптическом выпрямлении фемтосекундных импульсов в кристалле ниобата лития ($LiNbO_3$) [3]. Энергия выходящего ТГц-импульса соответствовала 400 нДж при длительности импульса 1 пс

и длине волны 0,4 мм. Пространственный размер ТГц-излучения на выходе генератора 25,4 мм. Для получения более высокой интенсивности в области перетяжки, было использовано короткофокусное параболическое зеркало с большой числовой апертурой, позволяющее получит пиковую интенсивность излучения в каустике ТГц-пучка равную 1×10^8 Вт/см^2.

Чувствительности и интенсивности описанной системы не было достаточно для измерения нелинейного показателя преломления кристалла ниобата лития в классической схеме z-сканирования. Однако повышение чувствительности на порядок при использовании метода eclipse z-сканирования уже позволяет наблюдать нелинейный отклик материала, что представлено на рис. 1. Показатель нелинейного преломления кристалла $LiNbO_3$ согласно выражению для оценки, представленному в [1], соответствует 2,5 x 10^{-11} см^2/Вт, что сходится с теоретическими работами [4].

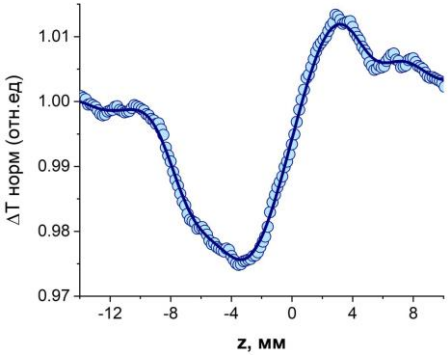


Рис. 1. Экспериментальная кривая eclipse z-сканирования

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 24-22-00084.

Список литературы

1. Xia T., et al. // Optics Letters. 1994. V. 19. No. 5. P. 317-319.
2. Tcypkin A.N., et al. // Physical Review Applied. 2021. V. 15. No. 5. P. 054009.
3. Tcypkin A.N., et al // Optics Express. 2019. V. 27. No. 8. P. 10419-10425.
4. Zhukova M.O., et al. // Photonics. MDPI. 2020. V. 7. No. 4. P. 98.

УДК 535(06)+004(06)

М.Ф. УМАРОВ
Вологодский государственный университет

ОСОБЕННОСТИ ИЗОЧАСТНЫХ СПЕКТРОВ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА КРИСТАЛЛОВ НИОБАТА БАРИЯ СТРОНЦИЯ

Приведены результаты исследования изочастотным методом спектроскопии комбинационного рассеяния света динамики кристаллических решёток кристаллов ниобата бария стронция при различных температурах, включая температуру структурного фазового перехода. Установлена корреляция между температурой сегнетоэлектрического фазового перехода и концентрацией бария в кристаллах ниобата бария стронция.

M.F. UMAROV
Vologda State University

FEATURES OF ISOFREQUENCY SPECTRA OF COMBINED LIGHT SCATTERING OF STRONTIUM NIOBIUM BARIUM CRYSTALS

The results of the investigation of the dynamics of crystal lattices of strontium barium niobate crystals at various temperatures, including the temperature of the structural phase transition, by the isofrequency Raman spectroscopy method are presented. A correlation has been established between the ferroelectric phase transition temperature and the concentration of barium in strontium barium niobate crystals.

Так как во многих диэлектрических кристаллах реализуются структурные фазовые переходы, то весьма важным для целей практического применения является изучение особенностей поведения структуры и физических свойств кристаллов вблизи точек фазовых переходов.

Целью настоящей работы является исследование изочастотным методом спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) динамики кристаллических решёток кристаллов ниобата бария стронция (НБС) при различных температурах, включая температуру фазового перехода.

На рис. 1 представлены изочастотные зависимости КРС кристалла НБС при геометрии рассеяния $X(ZZ)Y$ для концентраций $x = 0{,}25$; 0,39; 0,50; 0,67 и 0,75 при $\Omega = 0$. Как видно из рис. 1, с ростом концентрации

бария положение точки фазового перехода смещается в сторону высоких температур и одновременно увеличивается интенсивность рассеянного света. Максимальная интенсивность рассеянного излучения наблюдается при $x = 0{,}67$. Как отмечалось в [1], твёрдый раствор НБС с концентрацией $x = 0{,}67$ характеризуется наиболее упорядоченной кристаллической структурой и обладает наибольшим скачком спонтанной деформации и скачком энтропии.

На основе данных рис. 1 были определены изменения температуры фазового перехода и интенсивности рассеяния от концентрации бария; полученные зависимости показаны на рис. 2. Как видно из этого рисунка, максимальное значение интенсивности наблюдается при концентрации $x = 0{,}67$. В то же время, наблюдается, монотонное увеличение температуры фазового перехода от концентрации.

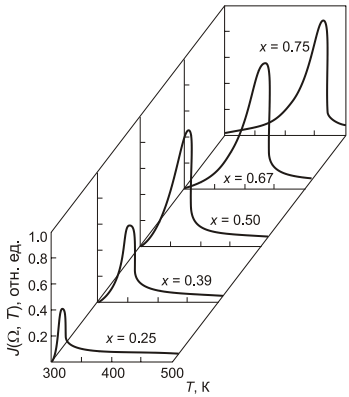


Рис. 1. Изочастотные зависимости J(Ω, T) кристалла НБС при различных концентрациях бария (Ω = 0)

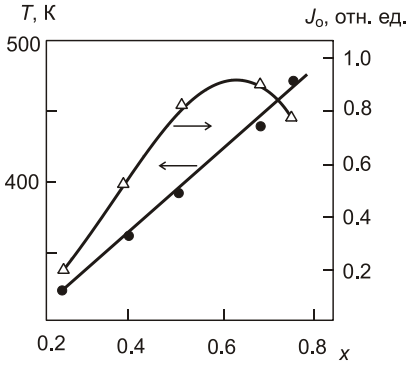


Рис. 2. Зависимости температуры фазового перехода и интенсивности рассеянного света от концентрации бария в кристаллах НБС

В результате выполненных измерений был получен температурный коэффициент мягкой моды и сделаны оценки константы Кюри–Вейсса и ряда других величин, характеризующих особенности переходного поведения параметров кристалла НБС.

Список литературы

1. Андреев И.А. Пьезоэлектрические, акустические и акустооптические свойства монокристаллов ниобата бария-стронция. Автореф. дисс. на соиск. учен. степ. к. ф.-м. н. Л., 1982.

О.Ю. ПИКУЛЬ, Н.В. СИДОРОВ[1], Н.А. ТЕПЛЯКОВА[1],
М.Н. ПАЛАТНИКОВ[1]

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск
[1]Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья Кольского научного центра РАН, Апатиты, Мурманская обл.

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИСТАЛЛА KTP МЕТОДАМИ ЛАЗЕРНОЙ КОНОСКОПИИ И ФОТОИНДУЦИРОВАННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА

Методы лазерной коноскопии и фотоиндуцированного рассеяния света применены для исследования оптической однородности кристаллических пластинок KTP, выполнено компьютерное моделирование коноскопических картин кристалла.

O.Yu. PIKOUL, N.V. SIDOROV[1], N.A. TEPLYAKOVA[1],
M.N. PALATNIKOV[1]

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk
[1]I.V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Material of Kola Science Center of the RAS, Apatity, Murmansk region

STUDY OF KTP CRYSTAL BY LASER CONOSCOPY AND PHOTO-INDUCED LIGHT SCATTERING METHODS

The methods of laser conoscopy and photo-induced light scattering were applied to study the optical homogeneity of KTP crystal plates, and computer modeling of conoscopic crystal patterns was performed

На нелинейных кристаллах титанил фосфата калия (KTP) базируются системы лазерного излучения с низкой мощностью, работающие в видимых или средних инфракрасных диапазонах. Кристалл KTP является двуосным, угол 2V между оптическими осями составляет около 37 ° для λ = 532,6 нм. Лазерная коноскопия [1], являясь экспресс-оценкой оптического качества кристаллов, позволяет анализировать оптическую однородность кристаллических образцов в том числе в срезах, параллельных плоскости оптических осей. Коноскопические картины кристаллов в таких срезах представляют собой две системы гипербол со взаимно перпендикулярными осями. Компьютерное моделирование таких коноскопических картин корреллирует с экспериментально полученными (рис. 1). Масштаб изображений одинаков, как и номинальная толщина

пластинок (1 мм), однако, в поле зрения попадает неодинаковое число интерференционных полос – больше всего гипербол-изохром на рис. 1*а* и 1*г* у первого образца, что указывает на наибольшую толщину из трёх образцов. В поле зрения отсутствуют разрывы и искажение гипербол, что свидетельствует об оптической однородности образцов. Увеличение мощности лазерного излучения практически не изменяет общий вид коноскопических картин.

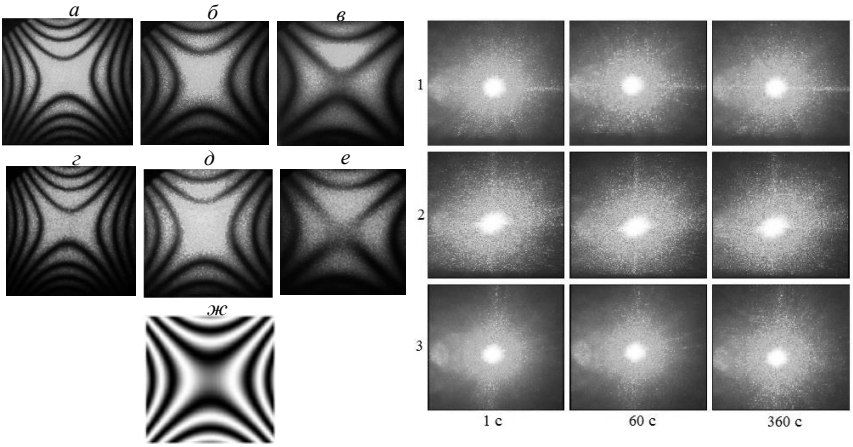


Рис. 1. Коноскопические картины кристалла КТР (пластины толщиной 1 мм): λ = 532 нм, P = 1 мВт (*а* - *в*) и 90 мВт (*г* - *е*), компьютерное моделирование коноскопической картины программой компьютерной математики Maple (*ж*); картины фотоиндуцированного рассеяния света кристалла КТР (1 - 3)

Для исследования эффекта фоторефракции [1] и, как следствие, фотоиндуцированного рассеяния света (ФИРС) цифровой фотокамерой регистрировалось рассеянное кристаллом излучение, которое падало на полупрозрачный экран, размещённый за кристаллом. Для исследованных образцов кристалла КТР ФИРС отсутствует. Следует отметить, что на картинах (2) с рис. 1 диаметр пятна рассеяния немного больше, очевидно в этой ориентации кристалл имеет чуть большую оптическую неоднородность, что подтверждает коноскопическая картина рис. 1*е* – центр поля зрения несколько размыт, резкость изображения снижена.

Список литературы

1. Сидоров Н.В., Пикуль О.Ю., Теплякова Н.А., Палатников М.Н. Лазерная коноскопия и фотоиндуцированное рассеяние света в исследованиях свойств нелинейно-оптического кристалла ниобата лития. М.: РАН, 2019.

УДК 535(06)+004(06)

В.Г. ДЮ, М.Г. КИСТЕНЕВА, С.М. ШАНДАРОВ,
А.В. ЦЫКАЛОВА, В.В. МУРАШКИН, Ю.Ф. КАРГИН[1]
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
[1]Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ФОТОИНДУЦИРОВАННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В КРИСТАЛЛЕ $Bi_{12}TiO_{20}$:Zn,P

Представлены результаты экспериментальных исследований фотоиндуцированного поглощения в кристалле $Bi_{12}TiO_{20}$:Zn,P, подвергнутом последовательной засветке непрерывным лазерным излучением: вначале с λ_i = 532 нм, а затем − с λ_n = 655 - 868 нм.

V.G. DYU, M.G. KISTENEVA, S.M. SHANDAROV,
A.V. TSYKALOVA[1], V.V. MURASHKIN, Yu.F. KARGIN[1]
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics
[1]Baikov Institute of Metallurgy and Material Sciences of the RAS, Moscow

PHOTOINDUCED ABSORPTION SPECTRA IN $Bi_{12}TiO_{20}$:Zn,P CRYSTAL

We investigated photoinduced absorption spectra in the $BiTiO_{20}$:Zn,P crystal as a result of sequential exposition to CW laser radiation first with the wavelength λ_i = 532 nm and then with the longer wavelength λ_n = 655 - 868 nm.

Легирование кристаллов силленитов оказывает влияние на их чувствительность к световому излучению и на время отклика, что связывается с изменениями их дефектной структуры [1].

В настоящей работе исследованы спектральные зависимости оптического поглощения в легированном цинком и фосфором кристалле титаната висмута $Bi_{12}TiO_{20}$:Zn,P (d = 8,39 мм), подвергнутом последовательной засветке коротковолновым излучением на длине волны λ_i = 532 нм и более длинноволновым излучением с λ_n = 655 - 862 нм.

На первом этапе эксперимента кристалл $Bi_{12}TiO_{20}$:Zn,P подвергался воздействию непрерывным лазерным излучением с длиной волны λ_i = 532 нм, которое приводило к увеличению его оптического поглощения. Временная зависимость таких изменений в показателе поглощения представлена на рис. 1. для интенсивности на входной грани кристалла I_i, составляющей около 220 мВт/см^2. Как видно из рис. 1

фотоиндуцированное поглощение в кристалле $Bi_{12}TiO_{20}$:Zn,P характеризуется участками быстрого и медленного роста. Временная зависимость изменений в поглощении удовлетворительно описывается суммой двух экспонент с постоянными времени τ_1 = 100 с и τ_2 = 1550 с.

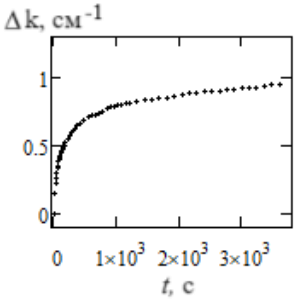


Рис. 1. Динамика изменения показателя поглощения света в кристалле BTO:Zn,P, индуцированная излучением с длиной волны 532 нм

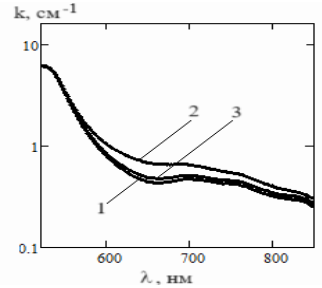


Рис. 2. Спектральные зависимости показателя поглощения в кристалле BTO:Zn,P до (1) и после облучения светом с λ_i = 532 нм (2) и λ_n = 655 нм (3)

На рис. 2 представлены спектральные зависимости оптического поглощения в кристалле $Bi_{12}TiO_{20}$:Zn,P в исходном состоянии (кривая 1) и после облучения непрерывным лазерным излучением с длиной волны λ_i = 532 нм (I_i ~ 36 мВт/см^2) в течение t_i = 7200 с (кривая 2). Получено, что такая экспозиция приводит к увеличению оптического поглощения $k(\lambda)$ в исследованном спектральном диапазоне 420 - 900 нм. Последующая длинноволновая засветка с λ_n = 655 - 862 нм на втором этапе приводит к просветлению кристалла и релаксации спектра поглощения к исходному состоянию (рис. 2, кривая 3).

Спектральные зависимости оптического поглощения в кристалле $Bi_{12}TiO_{20}$:Zn,P аппроксимировались в рамках модели примесного поглощения, учитывающей вклад фотовозбуждения электронов в зону проводимости с глубоких донорных центров и внутрицентровых переходов [2].

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки и высшего образования Российской Федерации в рамках Госзадания FEWM-2023-012 на 2023 – 2025 гг.

Список литературы

1. Marinova V., Ken Y.H., et al. // Proc. SPIE. 2013. V. 8776. P. 877605.
2. Kisteneva M.G., et al. // Quantum Electronics. 2015. V. 45. P. 685.

УДК 535(06)+004(06)

В.В. ДАВЫДОВСКАЯ, А.В. ФЕДОРОВА
Мозырский государственный педагогический университет им. И.П. Шамякина, Беларусь

ОСУЩЕСТВЛЕНИЕ ПЕРЕКАЧКИ ЭНЕРГИИ МЕЖДУ СИНФАЗНЫМИ ПУЧКАМИ В ФОТОРЕФРАКТИВНОМ КРИСТАЛЛЕ SBN

Теоретически обоснована возможность осуществления перекачки энергии между взаимодействующими пучками в фоторефрактивном кристалле SBN.

V.V. DAVYDOUSKAYA, A.V. FEDOROVA
Mozyr State Pedagogical University named after I.P. Shamyakin, Belarus

IMPLEMENTATION OF ENERGY TRANSFER BETWEEN IN-PHASE BEAMS IN A PHOTOREFRACTIVE SBN CRYSTAL

The possibility of energy transfer between interacting beams in a photorefractive SBN crystal is theoretically substantiated.

Одним из наиболее ценных для практического применения следствий фоторефрактивного эффекта является энергетический обмен между взаимодействующими в фоторефрактивном кристалле лазерными пучками, вследствие которого можно посредством одного пучка контролировать, переключать или усиливать другой пучок. Этот эффект можно успешно использовать в адаптивных оптических устройствах [0, 2] и фильтрах новизны (novelty filters) [3].

Как правило перекачка энергии между пучками осуществляется путём задания начальной разности фаз между пучками, однако если поперечные сечения взаимодействующих пучков на входе в кристалл расположены вдоль прямой, параллельной вектору напряжённости внешнего электрического поля приложенного вдоль оптической оси кристалла, то перекачка энергии может наблюдаться и без задания входной разности фаз между ними.

При вводе в фоторефрактивный кристалл SBN толщиной 20 мм, к которому вдоль оптической оси приложено внешнее электрическое поле с напряжённостью $E_0 = 3$ кВ/см, двух двумерных квадратных супергауссовых световых пучков с шириной 25 мкм и расстоянием между

пучками, равным ширине пучка (рис. 1*а*), наложение явлений дрейфа и диффузии электронов приводит в случае, когда поперечные сечения пучков на входе в кристалл расположены вдоль прямой, параллельной направлению внешнего электрического поля, к энергетическому обмену между пучками (рис. 1*б* - 1*г*).

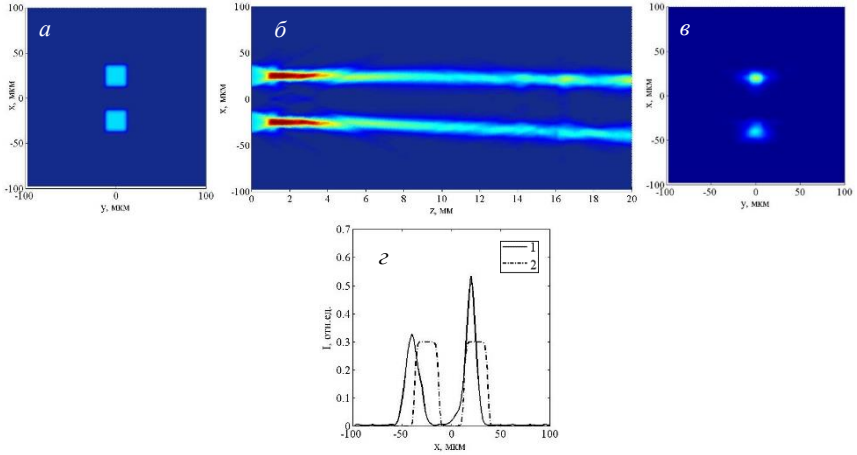


Рис. 1. Пучки на входе в кристалл SBN: световые пучки на входе в кристалл (*а*); распределение светового поля двумерных пучков по толщине кристалла (*б*); световые пучки на выходе из кристалла (*в*); 1 – профили световых пучков на выходе из кристалла, 2 – профили супергауссовых световых пучков квадратного сечения на входе в кристалл (*г*)

Рассмотренные в работе эффекты могут быть использованы при проектировании оптических волноводных устройств, осуществляющих каналирование световых потоков, передачу и обработку информации.

Список литературы

1. Шандаров С.М. и др. // Квантовая электроника. 2008. Т. 11. № 11. С. 1059-1069.
2. Колегов А.А. и др. // Изв. вузов. Физика. 2010. № 9/3. С. 147-148.
3. Woerdemann F. Holtmann C., Denz // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 93. P. 021108-021111.

УДК 535(06)+004(06)

К.А. МАРИНИЧЕВА, А.И. ИВАНОВА, И.А. КАПЛУНОВ,
К.А. ЕГОРОВА, С.А. ТРЕТЬЯКОВ, А.М. ИВАНОВ,
П.А. РАКУНОВ
Тверской государственный университет

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КРИСТАЛЛОВ

Проведены спектрометрические исследования оптического пропускания монокристаллов германия и кремния, подвергнутых воздействию знакопеременного магнитного поля с максимальной индукцией 1,85 Тл. Зафиксированы изменения коэффициента оптического пропускания.

K.A. MARINICHEVA, A.I. IVANOVA, I.A. KAPLUNOV,
K.A. EGOROVA, S.A. TRETYAKOV, A.M. IVANOV,
P.A. RAKUNOV
Tver State University

INFLUENCE OF MAGNETIC FIELD ON THE OPTICAL PROPERTIES OF SEMICONDUCTOR CRYSTALS

Spectrometric studies of the optical transmission of germanium and silicon single crystals exposed to an alternating magnetic field with a maximum induction of 1,85 T have been carried out. Changes in optical transmittance were recorded.

Полупроводниковые монокристаллы германия (Ge) и кремния (Si) активно используются в фотопребразователях и твердотельной электронике. Прозрачность кристаллов кремния в области спектра 3 - 5 мкм, кристаллов германия в диапазоне 2 - 15 мкм позволяет использовать эти кристаллы в инфракрасной оптике. В работе [1] установлено, что воздействие магнитного поля (МП) на полупроводник приводит к изменениям структурного совершенства решётки и электрофизических характеристик, что обусловлено возникновением в полупроводнике под действием МП кластеров френкелевских дефектов с аномально низкой энергией образования. Авторами [2, 3] показано, что обработка кристаллов кремния и германия магнитным полем приводит к изменениям структуры поверхности и микротвёрдости.

Целью работы являлось исследование оптического пропускания монокристаллов германия и кремния, подвергнутых действию

знакопеременного магнитного поля, создаваемого системой постоянных магнитов NdFeB, построенных по принципу дипольной Хальбах-структуры. Максимальная индукция магнитного поля составляла 1,85 Тл, время воздействия поля на кристалл – 3 мин. Монокристаллы Ge и Si n-типа проводимости выращены способом Чохральского в кристаллографическом направлении [111], удельное сопротивление германия ρ = 17 Ом·см, кремния ρ = 822 Ом·см. Образцы монокристаллов толщиной 0,5 см обрабатывались по оптической технологии.

В ходе исследования оптического пропускания на фурье-спектрометре были определены значения коэффициента пропускания T на длине волны 10,6 мкм для кристалла германия: для исходного образца T = 57,8 %; спустя 48 ч. после воздействия МП T = 55,2 %; через 336 ч. после МП T = 56 % (рис. 1). Изменения коэффициента пропускания монокристалла кремния после воздействия магнитного поля демонстрируют схожий характер, что обусловлено образованием дефектно-примесных комплексов вблизи поверхности и в объёме кристалла.

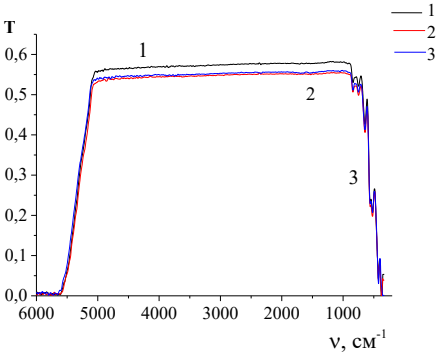


Рис. 1. Спектры пропускания монокристалла Ge
(1 – исходный образец, 2 – 48 ч. после МП, 3 – 336 ч. после МП)

Работа выполнена в рамках государственного задания по научной деятельности № 0817-2023-0006 с использованием ресурсов Центра коллективного пользования Тверского государственного университета.

Список литературы

1. Давыдов В.Н., Лоскутова Е.А., Найден Е.П. // Физика и техника полупроводников. 1989. Т. 23. Вып. 9. С. 1596-1600.

2. Макара В.А., Васильев М.А., Стебленко Л.П. и др. // Физика и техника полупроводников. 2008. Т. 42. № 9. С. 1061.

3. Гречкина М.В., Бормонтов Е.Н. // Конденсированные среды и межфазные границы. 2017. Т. 19. № 1. С. 133-139.

Н.Н. КУЗЬМИН[1,2], К.Н. БОЛДЫРЕВ[1], В.В. МАЛЬЦЕВ[2],
Е.П. МИКЛЯЕВА[3]
[1]Институт спектроскопии РАН, Троицк
[2]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
[3]Геологический институт РАН, Москва

СИНТЕЗ, ОПТИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ДВОЙНОГО БОРАТА $HoCr_3(BO_3)_4$

В работе приведены экспериментальные данные по изучению условий синтеза и роста бората $HoCr_3(BO_3)_4$, а также его оптических и магнитных свойств. Определены соотношения политипных модификаций этого соединения от условий получения, энергии штарковских уровней иона Ho^{3+}, обнаружен магнитный фазовый переход около 7 K.

N.N. KUZMIN[1,2], K.N. BOLDYREV[1], V.V. MALTSEV[2],
E.P. MIKLIAEVA[3]
[1]Institute of Spectroscopy of the RAS, Moscow, Troitsk
[2]Lomonosov Moscow State University
[3]Geological Institute RAS, Moscow

SYNTHESIS, OPTICAL AND MAGNETIC PROPERTIES OF DOUBLE BORATE $HoCr_3(BO_3)_4$

The paper presents experimental data on the study of the conditions for the synthesis and crystal growth of borate $HoCr_3(BO_3)_4$, as well as its optical and magnetic properties. The ratios of polytypic modifications of this compound depending on the conditions of preparation and the energy levels of the Ho^{3+} ion were determined, and a magnetic phase transition of about 7 K was discovered.

Бораты вызывают большой исследовательский интерес в связи с тем, что, в отличие от других солей кислородсодержащих кислот, они обладают большим разнообразием кристаллических структур [1]. Также эти соединения являются перспективными функциональными материалами [2] и нашли широкое применение в оптических системах [3].

Двойные бораты $RM_3(BO_3)_4$ (R = Y, La – Nd, Sm – Lu; M = Al, Sc, Cr, Fe, Ga) со структурным типом минерала хантита относятся к магнитоэлектрическим соединениям, обладают нелинейными оптическими и лазерными свойствами. Среди них большой интерес вызывают представители с двумя магнитными подсистемами, которые

образованы ионами 4*f*- и 3*d*-элементов. Именно они обуславливают необычные магнитные свойства, которые были обнаружены у редкоземельных железистых боратов этого семейства [4]. Редкоземельные хромовые бораты изучены в значительно меньшей степени. В литературе имеются немногочисленные сообщения об исследовании условий синтеза $RCr_3(BO_3)_4$, их структурных и магнитных свойств [5, 6]. На ранних этапах исследований полагалось, что структура этих соединений относится только к тригональной пространственной группе *R*32 [7], но в дальнейшем была обнаружена вторая структурная модификация с моноклинной пространственной группой *C*2/*c* [8]. Обе модификации имеют схожие структуры и часто кристаллизуются вместе. Этот факт усложняет интерпретацию экспериментальных данных. В связи с этим существует потребность в получение однофазных кристаллов этих соединений.

В настоящей работе изучена тройная система $Ho_2O_3 – Cr_2O_3 – B_2O_3$. Показано, что в субсолидусной области формируются шесть различный фаз, а именно $HoBO_3$, Ho_3BO_6, $HoCrO_3$, $CrBO_3$, $HoCr(BO_3)_2$ и $HoCr_3(BO_3)_4$. При выращивании кристаллов в псевдотройной системе $HoCr_3(BO_3)_4 – K_2Mo_3O_{10} – B_2O_3$ определены зоны монофазной кристаллизации $HoCr_3(BO_3)_4$, $CrBO_3$, Cr_2O_3, а также область их сокристаллизации. Исследование спектров поглощения кристаллов гольмий-хромового бората в дальнем инфракрасном диапазоне показало, что с увеличением доли $K_2Mo_3O_{10}$ в исходной шихте увеличивается доля ромбоэдрической фазы в получаемых кристаллах, что позволило уточнить область преимущественной кристаллизации ромбоэдрической модификации. В этой области получены наиболее качественные кристаллы $HoCr_3(BO_3)_4$ для определения схемы энергетических уровней иона Ho^{3+} в парамагнитном состоянии и температуры антиферромагнитного упорядочения этого соединения, которая составила около 7 K.

Н.Н. Кузьмин и К.Н. Болдырев входят в состав ведущей научной школы РФ «Оптико-спектральная наноскопия квантовых объектов и диагностика перспективных материалов» (проект НШ-776.2022.1.2).

Список литературы

1. Mutailipu M., et al. // Chemical Reviews. 2020. V. 121 (3). P. 1130.
2. Chen C., et al. // Nature. 1995. V. 373. P. 322.
3. Mutailipu M., et al. // Accounts of Chemical Research. 2019. V. 52 (3). P. 791.
4. Кадомцева А.М. и др. // Физика низких температур. 2010. Т. 36 (6). С. 640.
5. Bludov A., et al. // J. Magnetism and Magnetic Materials. 2020. V. 512. P. 167010.
6. Кузьмин Н.Н. и др. // Неорганические материалы. 2020. V. 56 (8). P. 873.
7. Ballman A.A. // American Mineralogist. 1962. V. 47 (11-12). P. 1380.
8. Куражковская В.С. и др. // Журнал структурной химии. 2008. Т. 49 (6). С. 1074.

К.А. СУББОТИН[1,2], Ю.И. ЗИМИНА[1,2], Я.С. ДИДЕНКО[1,2], А.И. ТИТОВ[1,2], Л.И. ИСХАКОВА[1], Д.А. ЛИС[1], С.К. ПАВЛОВ[1,2], К.В. КУЛЕШОВА[1,2], П.А. ЛОЙКО[3], Г.З. ЭЛАБЕДИН[4], А. НАДИ[3], П. КАМИ[3], А. БРАУД[3], Р.М. СОЛЕ[4], М. АГУИЛО[4], Ф. ДИАС[4], Х. МАТЕОС[4]

[1]Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва
[2]Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва
[3]Университет Кан-Нормандия, Кан, Франция
[4]Университет Ровиры-и-Вирхили, Таррагона, Испания

РОСТ, СТРУКТУРА И СПЕКТРОСКОПИЯ ЛАЗЕРНОГО КРИСТАЛЛА $MgMoO_4$, ЛЕГИРОВАННОГО ИОНАМИ Yb^{3+}

Методом Чохральского был выращен перспективный лазерный кристалл Yb^{3+}: $MgMoO_4$. Измерена фактическая концентрация Yb^{3+} в кристалле. Структура кристалла уточнена с помощью рентгенофазового анализа. Выполнен комплекс исследований кристалла методами оптической и рамановской спектроскопии, показавшей перспективность кристалла для применений в фотонике.

K.A. SUBBOTIN[1,2], Yu.I. ZIMINA[1,2], Ya.S. DIDENKO[1,2], A.I. TITOV[1,2], L.I. ISHAKOVA[1], D.A. LIS[1], S.K. PAVLOV[1,2], K.V. KULESHOVA[1,2], P.A. LOIKO[3], G.Z. ELABEDINE[4], A. NADI[3], P. CAMY[3], A. BRAUD[3], R.M. SOLÉ[4], M. AGUILÓ[4], F. DÍAZ[4], X. MATEOS[4]

[1]Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow
[2]Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow
[3]Université de Caen Normandie, Caen, France
[4]Universitat Rovira i Virgili, Tarragona, Spain

GROWTH, STRUCTURE AND SPECTROSCOPY OF LASER CRYSTAL $MgMoO_4$ DOPED BY Yb^{3+} IONS

Yb^{3+}: $MgMoO_4$ single-crystal was grown by the Czochralski method. The actual Yb^+ doping level was measured. Structure of the crystal was determined using x-ray analysis. A complex of studies of the crystal by the methods of optical and Raman spectroscopy was carried out, which showed promising applications of this crystal in photonics.

Кристалл $MgMoO_4$ принадлежит к семейству моноклинных молибдатов (вольфраматов) двухвалентных металлов MTO_4 (M – Mg, Zn, Cd, T – W, Mo), в последнее время привлекающих большое

внимание как активные лазерные среды, пригодные для генерации ультракоротких импульсов [1]. Данная работа посвящена выращиванию, исследованию структурных особенностей, рамановских и спектрально-люминесцентных характеристик нового кристалла Yb^{3+}: $MgMoO_4$.

Кристалл Yb^{3+}:$MgMoO_4$ выращен методом Чохральского на воздухе из Pt/Rh тигля. Методом рентгено-спектрального (энергодисперсионного) микроанализа была измерена фактическая концентрация Yb^{3+} в кристалле, составившая 0,2 ат. %. Таким образом, коэффициент распределения данной примеси в кристалле можно оценить в 0,029. Рентгенофазовый анализ показал, что кристалл имеет моноклинную структуру (пространственная группа C2/*m*), параметры решётки a = 10.276(9) Å, b = 9.289(6) Å, c = 7.027(6) Å и β = 106.903(8)°, что немного превышает параметры для номинально-чистого кристалла [2]. Поляризованные рамановские спектры содержат интенсивные пики в двух различных диапазонах: 115 - 450 $см^{-1}$ и 750 - 1050 $см^{-1}$. Поляризованный спектр оптического поглощения ионов Yb^{3+} в $MgMoO_4$ приведён на рис. 1. Пиковое сечение поглощения $\sigma_{abs} = 3{,}9\times10^{-20}$ $см^2$ для $E||a$, для $E||b$ $\sigma_{abs} = 4{,}5\times10^{-20}$ $см^2$, для $E||c$ $\sigma_{abs} = 2{,}9\times10^{-20}$ $см^2$. Кристалл Yb^{3+}: $MgMoO_4$ имеет широкую, сильно поляризованную полосу излучения в диапазоне от 870 до 1080 нм (рис. 2). Время жизни состояния $^2F_{5/2}$ Yb^{3+} в $MgMoO_4$ составило 0,63 мс. Низкотемпературные спектры поглощения и люминесценции при узкополосном возбуждении на различных длинах волн показывают наличие, как минимум, 8 неэквивалентных центров Yb^{3+}.

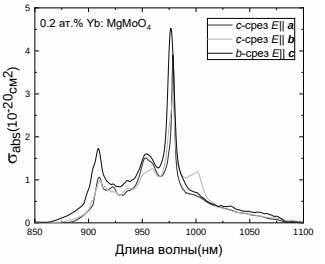


Рис. 1. Поляризованные спектры поглощения ионов Yb^{3+} в $MgMoO_4$

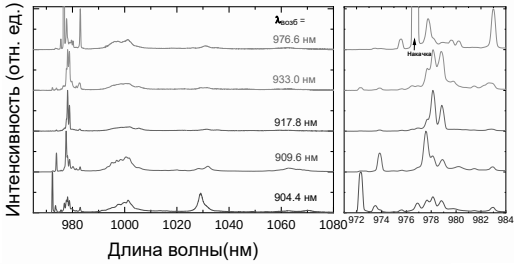


Рис. 2. Спектры поляризованной люминесценции ионов Yb^{3+} в $MgMoO_4$

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-22-00416).

Список литературы

1. Li L., Huang Y., Zhang L. et al. // PLoS ONE. 2012. V. 7(1). P. e30327.
2. Bakakin V., Klevtsova R., Gaponenko L. // Kristallografiya. 1982. V. 27. P. 38-42.

УДК 535(06)+004(06)

Л.Е. СЕМЕНОВА
Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНОГО РАССЕЯНИЯ ПРИ ДВУХФОТОННОМ ВОЗБУЖДЕНИИ В КРИСТАЛЛЕ CdS

Рассматривается процесс резонансного гиперкомбинационного рассеяния, включающий двухфотонные переходы в *s*-экситоны B и C серий, в кристалле CdS со структурой вюртцита с учётом возможных дипольных переходов в более глубокую валентную зону.

L.E. SEMENOVA
Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow

THEORETICAL STUDY OF RESONANT SCATTERING UNDER TWO-PHOTON EXCITATION IN A CdS CRYSTAL

The resonant hyper-Raman scattering process including the two-photon transitions to *s*-excitons of the B and C series in a CdS crystal with the wurtzite structure is considered, taking into account the possible dipole transitions to the deeper valence band.

Ранее при исследовании гиперкомбинационного рассеяния (ГКР) света в кристалле CdS наблюдалось увеличение интенсивности ГКР на продольных оптических (LO) фононах при приближении удвоенной энергии кванта возбуждающего излучения к области экситонных резонансов [1]. Позже наблюдаемый рост интенсивности рассеяния объяснялся механизмом ГКР, включающим двухфотонные дипольные переходы в экситоны *s*-типа [2]. Однако, при геометрии рассеяния, используемой в эксперименте [1], процесс ГКР, включающий двухфотонные дипольные переходы в *s*-экситоны A серии, вносит вклад в интенсивность рассеяния наряду с последовательностью промежуточных экситонных состояний *s*-*p*-*s* [3]. Причём в этом случае процесс ГКР, связанный с двухфотонными переходами в A экситоны *s*-типа, возможен только при смешивании *p*-подобных и *d*-подобных состояний, т.е. преобразующихся в соответствии с неприводимыми представлениями Γ_5 и Γ_6, вследствие спин-орбитального взаимодействия в подзоне A и нижележащей валентной зоне Γ_9 [3 - 5].

Процессы рассеяния, включающие двухфотонные дипольные переходы в *s*-экситоны B и C серий, также могут вносить вклад в ГКР [2]. А эти двухфотонные переходы могут происходить, в частности, через промежуточные *s*-экситонные состояния, связанные с нижележащей валентной зоной Γ_9, дипольные переходы в которую разрешены правилами отбора и возможны при смешивании *p*- и *d*-подобных состояний [4, 6]. В работе [6] было показано, что учёт возможных переходов в эту зону может при определённых условиях оказать заметное влияние на частотную зависимость поперечного сечения ГКР на LO фононах, обусловленного запрещённым фрелиховским механизмом экситон-фононного взаимодействия.

В представленной работе был также рассмотрен процесс ГКР на LO фононах, включающий двухфотонные дипольные переходы в B и C экситоны *s*-типа, для геометрии рассеяния, используемой в эксперименте [1]. Но в этом случае процесс ГКР может быть связан как с запрещённым фрелиховским взаимодействием, так и с “разрешённым”, то есть в приближении нулевого волнового вектора фонона [7]. При этом рассматривалось как “разрешённое” внутризонное, так и межзонное фрелиховское взаимодействие. В общем случае экситон-решёточное взаимодействие через деформационный потенциал также вносит вклад ГКР, но в данной работе им пренебрегалось.

Анализ показал, что, как и в случае запрещённого фрелиховского взаимодействия [6], учёт возможных дипольных переходов в нижележащую валентную зону Γ_9 может оказать заметное влияние на частотную зависимость относительного вклада “разрешённого” внутризонного фрелиховского механизма рассеяния в ГКР, а при определённых условиях привести к появлению на ней дополнительной особенности. Межзонное фрелиховское взаимодействие, которое не играет существенной роли, если дипольными переходами в более глубокую валентную зону Γ_9 пренебрегается, при учёте этих переходов может вносить заметный вклад в процесс ГКР, связанный с “разрешённым” фрелиховским взаимодействием.

Список литературы

1. Maslov V.A., Ondriash K.K., et al. // Laser Phys. 1996. V. 6. P. 132.
2. Semenova L.E., Prokhorov K.A. // Laser Phys. Lett. 2004. V. 1. P. 253.
3. Semenova L.E. // J. Russ. Laser Res. 2021. V. 42. P. 721.
4. Gutsche E., Jahne E. // Phys. Stat. Sol. 1967. V. 19. P. 823.
5. Lew Yan Voon L.C., Willatzen M., et al. // Phys. Rev. B, 1996. V. 53. P. 10703.
6. Semenova L.E. // Laser Phys. 2022. V. 32. P. 084004.
7. Martin R.M. // Phys. Rev. B, 1971. V. 4. P.3676.

УДК 535(06)+004(06)

А.Д. МОЛЧАНОВА[1], М.О. ДИАБ[1,2], К.Н. БОЛДЫРЕВ[1], М.Н. ПОПОВА[1]

[1]Институт спектроскопии РАН, Троицк
[2]Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный

ЛЮМИНЕСЦЕНТНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ КРИСТАЛЛА $YAl_3(BO_3)_4$:Cr

В настоящей работе представлено люминесцентное исследование монокристалла $YAl_3(BO_3)_4$:Cr, широко изучаемого в настоящего время для применения в области люминесцентной термометрии. В основном внимание сосредоточено на спектральном диапазоне, соответствующем линиям переходов $^2E_g \rightarrow {}^4A_{2g}$ в ионе Cr^{3+} – так называкмых *R*-линий. Температурная зависимость отношения интенсивностей линий R_1 и R_2 хорошо соответствует распределению Больцмана, что благоприятно для создания больцмановского люминесцентного термометра на основе $YAl_3(BO_3)_4$:Cr.

A.D. MOLCHANOVA[1], M.O. DIAB[1,2], K.N. BOLDYREV[1], M.N. POPOVA[1]

[1]Institute of Spectroscopy of the RAS, Troitsk
[2]Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

LUMINESCENT SPECTROSCOPY OF $YAl_3(BO_3)_4$:Cr CRYSTAL

This work presents a luminescence study of a $YAl_3(BO_3)_4$:Cr single crystal, which is currently widely studied for applications in the field of luminescence thermometry. The most attention is focused on the spectral range corresponding to the lines of the $^2E_g \rightarrow {}^4A_{2g}$ transitions in the Cr^{3+} ion – so-called *R*-lines. The temperature dependence of the R_1- and R_2-lines intensity ratio corresponds well to the Boltzmann distribution, which is favorable for creating a Boltzmann luminescent thermometer based on $YAl_3(BO_3)_4$:Cr.

Иттрий-алюминиевые бораты $YAl_3(BO_3)_4$ (YAB) чрезвычайно интересны благодаря своим отличным физическим характеристикам, химической стабильности, высокой оптической нелинейности и низкому тушению люминесценции. Кристаллы YAB, легированные различными ионами редкоземельных и переходных металлов, являются хорошо известными люминофорами, перспективными для использования в качестве материалов для дисплеев, лазеров, сцинтилляторов, светодиодов

и средств медицинской визуализации. Исследуемый в настоящей работе кристалл YAB: Cr также исследуется в качестве материала для светодиодов [1], в частности, как люминофор для светодиодов для выращивания растений, обладающий превосходной термической стабильностью и высоким квантовым выходом [2].

Разнообразные оксиды, легированные ионами Cr^{3+}, в настоящее время широко исследуются для создания на их основе люминесцентных термометров [3 - 5]. Недавно сообщалось, что для YAB: Cr^{3+} реализовано сочетание оптического нагрева и люминесцентной термометрии [6]. Здесь, как и в большинстве работ по исследованию люминесцентной термометрии соединений с ионами Cr^{3+}, для измерения температуры использовалось зависящее от температуры отношение интенсивностей люминесценции переходов $^4T_2 \rightarrow {}^4A^2$ и $^2E \rightarrow {}^4A^2$ в ионах Cr^{3+}. При этом основное внимание уделялось биологическому диапазону температур. Лишь в ряде работ для определения температуры предлагалось использовать отношение интенсивности люминесценции линий переходов из расщеплённого орбитального дублета ^2E в основное состояние $^4A^2$ (линии R_1 и R_2). В частности, такое исследование было проведено для ряда иттрий-алюминиевых оксидов, легированных хромом [7]. Однако подобные работы, посвящённые YAB: Cr, в литературе отсутствуют.

В настоящей работе обсуждается возможность люминесцентной термометрии на основе отношения интенсивностей линий R_1 и R_2 в YAB: Cr. Благодаря невысокому значению величины энергетической щели между компонентами дублета ^2E ($\Delta E = 56$ см$^{-1}$), измерение температуры может осуществляться при криогенных температурах (< 40 K). Также обсуждается возможность измерения температуры по температурным зависимостям ширины и сдвига R-линий.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (в рамках гранта № 23-12-00047).

Список литературы

1. Malysa B., Meijerink A., Jüstel T. // J. Lumin. 2016. V. 171. P. 246.
2. Shi M., Yao L., Xu J., Liang C., et al. // J. Am. Ceram. Soc. 2021. V. 104. P. 3279.
3. Back M., Ueda J., Brik M.G., et al. // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2020. V. 12. P. 38325.
4. Mondal A., Manam J. // Ceram. Int. 2020. V. 46. P. 23972.
5. Zhang X., Chen X., Zhou C. // Ceram. Int. 2022. V. 48. P. 19484.
6. Elzbieciak-Piecka K., Marciniak L. // Sci. Rep. 2022. V. 12. P. 16364.
7. Mykhaylyk V., Kraus H., Zhydachevskyy Y., et al. // Sensors. 2020. V. 20. P. 5259.

Ю.И. ЗИМИНА[1,2], К.А. СУББОТИН[1,2], А.И. ТИТОВ[1,2], Д.А. ЛИС[1], Я.С. ДИДЕНКО[1,2], К.В. КУЛЕШОВА[1,2], П.А. ЛОЙКО[3], Г.З. ЭЛАБЕДИН[4], П. ЧЖУНБЭНЬ[5], А. НАДИ[3], П. КАМИ[3], А. БРАУД[3], Р.М. СОЛЕ[4], М. АГУИЛО[4], Ф. ДИАС[4], В. ЧЭНЬ[6], Х. МАТЕОС[4], В. ПЕТРОВ[6]

[1]Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва
[2]Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва
[3]Университет Кан-Нормандия, Кан, Франция
[4]Университет Ровиры-и-Вирхили, Таррагона, Испания
[5]Шаньдунский университет, Цзинань, Китай
[6]Институт нелинейной оптики и короткоимпульсной спектроскопии им. М. Борна, Берлин, Германия

ИССЛЕДОВАНИЯ НОВОГО ЛАЗЕРНОГО КРИСТАЛЛА $ZnWO_4$, ЛЕГИРОВАННОГО ИОНАМИ Tm^{3+}

Монокристаллы Tm^{3+}: $ZnWO_4$ были выращены методом Чохральского с использованием в качестве зарядовых компенсаторов ионы Li^+. Измерены дисперсии, температурные коэффициенты показателей преломления, а также механические прочностные характеристики кристаллов. Проведены спектрально-люминесцентные исследования кристаллов. Впервые на кристалле Tm^{3+}, Li^+: $ZnWO_4$ получена лазерная генерация на длине волны ~ 2 мкм.

Yu.I. ZIMINA[1,2], K.A. SUBBOTIN[1,2], A.I. TITOV[1,2], D.A. LIS[1], Ya.S. DIDENKO[1,2], K.V. KULESHOVA[1,2], P.A. LOIKO[3], G.Z. ELABEDINE[4], P. ZHONGBEN[5], A. NADI[3], P. CAMY[3], A. BRAUD[3], R.M. SOLÉ[4], M. AGUILÓ[4], F. DÍAZ[4], W. CHEN[6], X. MATEOS[4], V. PETROV[6]

[1]Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow
[2]Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow
[3]Université de Caen Normandie, Caen, France
[4]Universitat Rovira i Virgili, Tarragona, Spain
[5]Shandong University, Jinan, China
[6]Max Born Institute for Nonlinear Optics and Short Pulse Spectroscopy, Berlin, Germany

INVESTIGATIONS OF A NEW LASER CRYSTAL $ZnWO_4$ DOPED BY Tm^{3+} IONS

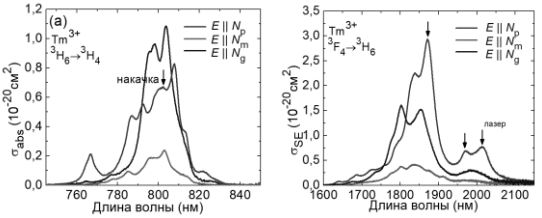
Tm^{3+}: $ZnWO_4$ single-crystals codoped with Li^+ ions serving for local charge compensation were grown by the Czochralski method. The refractive index dispersions,

the temperature coefficients of refractive indices as well as the mechanical strength characteristics of the crystals were measured. Spectral studies of the crystals were carried out. The first laser operation above 2 μm from such crystals was obtained.

Моноклинные кристаллы вольфраматов двухвалентных ионов MWO_4 (где M = Mg, Zn, Cd), легированные редкоземельными ионами, привлекают большое внимание в качестве перспективных лазерных матриц [1]. В частности, на кристалле Tm^{3+}: $MgWO_4$ была получена перестраиваемая генерация в диапазоне, выходящем за пределы 2 мкм [2]. Однако выращивание кристалла $MgWO_4$ проблематично. Структурным аналогом кристалла $MgWO_4$ является $ZnWO_4$. Этот кристалл плавится конгруэнтно и может быть легко выращен методом Чохральского.

Кристаллы Tm^{3+}, Li^+: $ZnWO_4$ были выращены методом Чохральского на воздухе из Pt тигля. Методом призмы были измерены дисперсии и температурные коэффициенты показателей преломления. Методом индентирования были измерены микротвёрдости и трещиностойкости кристаллов для трёх кристаллографических направлений.

Исследованы спектрально-люминесцентные (рис. 1) и генерационные (рис. 2) характеристики кристаллов. С помощью спектроскопии при 6К были определены величины штарковского расщепления уровней $^3H_6$ и $^3F_4$ иона Tm^{3+} в кристалле, составившие для уровня $^3H_6$ ΔE = 644 см$^{-1}$.



а *б*

Рис. 1. Спектры поглощения (*а*) и вынужденного излучения (*б*) ионов Tm^{3+} в кристалле Tm, Li: $ZnWO_4$

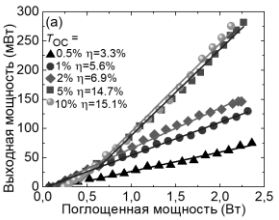


Рис. 2. Энергетические характеристики лазера на кристалле Tm^{3+}, Li^+: $ZnWO_4$

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-22-00416).

Список литературы

1. Zhang L., Chen W., et al. // Opt. Mater. Express. 2016. V. 6 (5). P. 1627-1634.
2. Loiko P., Zhang L., et. al. // J. Alloy Compd. 2018. V. 763. P. 581-591.

В.И. ПАВЛОВ[1,2]
[1]Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Московская обл.
[2]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

В ПОИСКАХ ОПТИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ТОЧКИ ГОРЯЧЕГО МИКРОРЕЗОНАТОРА ИЗ ФТОРИДА МАГНИЯ

Тепловые эффекты в оптических микрорезонаторах вызывают сдвиги частот, что не позволяет использовать такие микрорезонаторы в прецизионных приложениях. В данной работе было показано, что при определённых соотношениях температуры и радиуса микрорезонатора MgF_2 можно компенсировать сдвиги частоты, вызванные мощностью накачки.

V.I. PAVLOV[1,2]
[1]Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering, Mendeleevo, Moscow region
[2]Lomonosov Moscow State University

IN SEARCH OF THE OPTIMAL TEMPERATURE POINT FOR A HOT MAGNESIUM FLUORIDE MICRORESONATOR

Thermal effects in optical microresonators cause frequency shifts, which prevent the use of such microresonator in precision applications. In this work was shown that, at certain ratios of MgF_2 microresonator temperature and radius, it is possible to compensate frequency shifts induced by the pump power.

Кристаллические микрорезонаторы из фторида магния (MgF_2) демонстрируют сверхвысокую добротность (более 10^9) [1], однако нестабильность частоты [2] может быть критичной практически во всех прецизионных приложениях, таких как атомные оптические стандарты частоты [3].

Для улучшения стабильности частоты были разработаны различные методы. Одним из способов стабилизации резонансных частот является криогенное охлаждение [4]. Однако при этом зачастую жертвуются компактность и практичность полученной системы.

Мы предложили принципиально иной подход к стабилизации собственных частот – нагрев микрорезонатора. Известно, что для многих кристаллов, используемых в оптике, существует сложная температурная зависимость тепловых параметров (теплового расширения и

коэффициента терморефракции) [5]. В нашей работе мы использовали температурную зависимость тепловых эффектов в кристаллических микрорезонаторах MgF_2 и предложили способ снижения нестабильности частоты, связанной с поглощением мощности накачки.

Для этого мы рассчитали методом конечных элементов сдвиги частоты, вызванные мощностью накачки с учётом температурной зависимости коэффициента терморефракции в диапазоне 300 - 600 для микрорезонаторов различного радиуса. Так как терморефракция определяется температурой в области распространения ЭМ моды T_m, а тепловое расширение – средней по объёму микрорезонатора T_{av}, нам удалось подобрать параметры микрорезонатора так, чтобы компенсировать результирующий сдвиг резонансных частот от двух тепловых эффектов (рис. 1 и 2). Параметры микрорезонатора были выбраны таким образом, чтобы появилась возможность компенсировать сдвиги частоты. вызванные поглощением оптической мощности. В результате, при температуре 483 К в микрорезонаторах радиусом 6 мм можно получить нулевой сдвиг частоты, вызванный мощностью накачки.

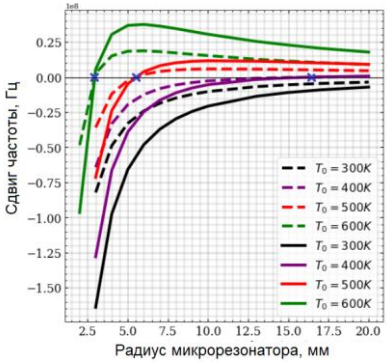


Рис. 1. Сдвиги частот при мощности накачки 0,1 Вт (штриховые линии) и P = 0,2 Вт (сплошные линии)

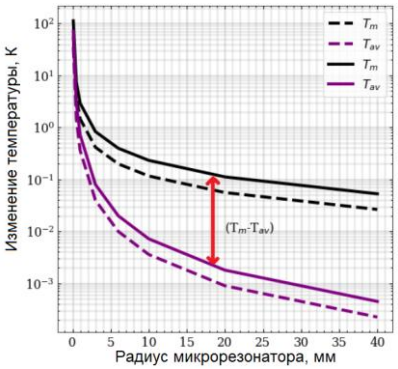


Рис. 2. Изменение температуры объёма микрорезонатора T_{av} и в области ЭМ моды T_m при мощности накачки 0,1 Вт (штриховые линии) и 0,2 Вт (сплошные линии)

Список литературы

1. Qu Z., Liu X., et al. // Optics Express. 2023. V. 31. P. 3005-3016.
2. Lim J., Savchenkov A. A., et al // Nat. Commun. 2017.V. 8. P. 8.
3. Newman Z. L., Maurice V., et. al. // Optica. 2019. V. 6. P. 680-685.
4. Moille G., Lu X., et al. // Phys. Rev. Applied. 2019. V. 12. P. 034057.
5. Tropf W.J. // Optical Engineering. 1995. V. 34 P. 5.

А.Р. ГАТАТДИНОВ[1,2], Ф.А. УШАКОВ[1,2], В.И. ПАВЛОВ[2,3]
[1]Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
[2]Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Московская обл.
[3]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ НАГРЕВА МИКРОРЕЗОНАТОРА ИЗ ФТОРИДА МАГНИЯ ПРИ ПОГЛОЩЕНИИ ОПТИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ НАКАЧКИ

Приведено сравнение методов оценки нагрева дискового микрорезонатора из фторида магния при поглощении оптической мощности накачки. Была измерена температура микрорезонатора с помощью тепловизора. Было проведено измерение тепловых сдвигов частоты микрорезонатора и предложен способ уменьшения тепловых сдвигов частоты.

A.R. GATATDINOV[1,2], F.A. USHAKOV[1,2], V.I. PAVLOV[2,3]
[1]National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)
[2]Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering, Mendeleevo, Moscow region
[3]Lomonosov Moscow State University

COMPARISON OF METHODS FOR ESTIMATING HEATING OF A MAGNESIUM FLUORIDE MICRORESONATOR DURING THE ABSORPTION OF OPTICAL PUMP POWER

We present the comparison of methods for estimating the heating of a disk microresonator made of magnesium fluoride during the absorption of optical pumping power. The temperature of the microresonator was measured using a thermal imager. Also, we measured thermal shifts of the microresonator frequencies and propose a method to reduce thermal frequency shifts.

Кристаллические микрорезонаторы из фторида магния (MgF_2) демонстрируют сверхвысокую добротность [1], однако нестабильность частоты может быть критичной практически во всех прецизионных приложениях, таких как атомные оптические стандарты частоты [2]. Поглощение оптической мощности в микрорезонаторе может приводить к проявлению тепловых эффектов, которые влияют на генерацию

оптических частотных гребёнок, могут приводить к различного рода тепловым флуктуациям, дрейфам и неустойчивостям [3].

Целью работы является экспериментальное исследование нагрева дискового микрорезонатора из MgF_2 с диаметром 3 при поглощении оптической мощности накачки. Схема экспериментальной установки для измерения сдвигов частоты представлена на рис. 1. В работе предложен способ уменьшения сдвигов частоты на ~ 10 % с помощью подведения теплоотвода к шляпке резонатора (рис. 2).

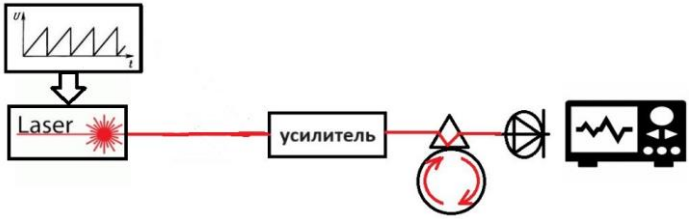
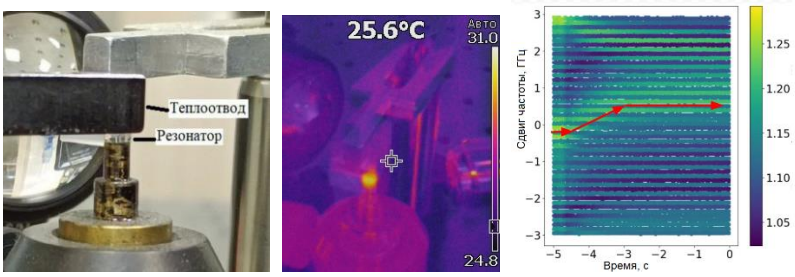


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для измерения сдвигов частоты



а *б* *в*

Рис. 2. Измерения температуры резонатора тепловизором (*а*), схема подведения теплоотвода к резонатору (*б*), сдвиг частоты при подведении теплоотвода (*в*)

Список литературы

1. Qu Z., Liu X., et al. // Optics Express. 2023. V. 31. P. 3005-3016.
2. Newman Z.L., Maurice V., et al. // Optica. 2019. V. 6, P. 680-685.
3. Pavlov V.I., et al. // Photonics. 2023. V. 10. P. 1131.

Э.С. СЕКТАРОВ[1,2], А.А. ХОМИЧ[3], А.П. БОЛЬШАКОВ[3],
В.С. СЕДОВ[3], В.Г. РАЛЬЧЕНКО[3] К.Н. БОЛДЫРЕВ[1]
[1]Институт спектроскопии РАН, Троицк
[2]Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва
[3]Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА НА ЦЕНТРЫ ОКРАСКИ В АЛМАЗЕ

В работе представлены данные по исследованию влияния отжига на алмаз с азотными (NV) и кремниевыми (SiV) центрами окраски. Перед отжигом алмаз был облучён электронами с энергией 2 МэВ для образования дефектов в кристалле. В ходе экспериментов были получены спектры поглощения и фотолюминесценции. Анализ полученных спектров показал изменения концентраций SiV и NV, выявлены температуры, при которых начинается образование центров окраски в алмазе.

E.S. SEKTAROV[1,2], A.A. KHOMICH[3], A.P. BOLSHAKOV[3],
V.S. SEDOV[3], V.G. RALCHENKO[3], K.N. BOLDYREV[1]
[1]Institute of Spectroscopy of the RAS, Troitsk
[2]National Research University Higher School of Economics, Moscow
[3]Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow

INFLUENCE OF ANNEALING ON COLOR CENTERS IN DIAMOND

The work presents data on the study of the annealing effect on diamond with nitrogen (NV) and silicon (SiV) color centers. The diamond had irradiated with electrons with an energy of 2 MeV to form defects in the crystal before the annealing. Absorption and photoluminescence spectra were obtained. Analysis of the obtained spectra showed changes in the concentrations of SiV and NV centers during diamond annealing, the temperatures at which the formation of color centers in diamonds began were identified.

Центры окраски в алмазах используются в различных областях науки и могут применяться в оптической квантовой памяти, квантовой сенсорике, лазерах, квантовой криптографии и биофотонике [1]. Изучение формирования центров окраски представляет как фундаментальный, так и прикладной интерес. Цель работы – экспериментальное исследование влияния отжига на кремниевые (SiV) и азотные (NV) центры окраски в алмазе.

В работе исследован алмаз, выращенный методом осаждения из газовой фазы. Алмаз облучался электронами с энергией 2 МэВ для получения дефектов внутри кристаллической решётки. Затем алмаз отжигался при температурах от 200 °C до 1640 °C. После каждого отжига алмаз исследовался методами поглощения, комбинационного рассеяния света (КРС) и фотолюминесценции. Спектры поглощения получены на фурье-спектрометре высокого разрешения Bruker IFS125HR при температуре T = 5 K. Спектры фотолюминесценции и КРС получены на спектрометре LabRam HR800 с возбуждающей длиной волны 473 нм при комнатной температуре.

В ходе экспериментов получены спектры SiV и NV-центров при различных температурах отжига. При помощи спектров поглощения были оценены концентрации центров окраски в алмазах (рис. 1). Было обнаружено, что SiV-центры начинают формироваться при температуре отжига около 550 °C. NV-центры начинают образовываться при такой же температуре. Данный факт показывает, что при температурах более 550 °C начинается миграция дефектов и их объединение. Помимо SiV и NV центров были исследованы другие известные дефекты в алмазе. Обнаружены неизвестные линии, которые могут быть новыми зарядовыми состояниями SiV-центра.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (в рамках гранта № 19-72-10132-П).

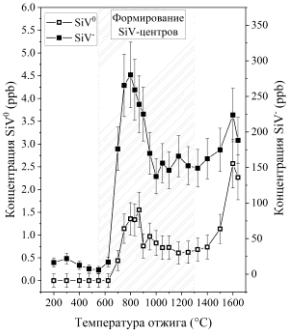


Рис. 1. График зависимости концентраций SiV-центров от температуры отжига, штрихованная область обозначает температуры, при которых происходит формирование SiV-центров

Список литературы

1. Rodgers L.V.H., Hughes L.B., et al. // MRS Bulletin. 2021. V. 46. P. 623-633.

УДК 535(06)+004(06)

С.В. МЕДНИКОВ, С.С. ЖУКОВ[1]
Волгоградский государственный технический университет
[1]Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный

СОЛЬВАТОХРОМНЫЙ ЭФФЕКТ В ОКРЕСТНОСТИ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА В СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКЕ ТГС

Приведены результаты исследования оптического поглощения монокристалла триглицинсульфата, легированного молекулами красителя Родамин 6Ж, в температурном интервале, содержащем точку фазового перехода. Обнаружено изменение положения максимумов полос поглощения в зависимости от близости к температуре фазового перехода.

S.V. MEDNIKOV, S.S. ZHUKOV[1]
Volgograd State Technical University
[1]Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

SOLVATOCHROMIC EFFECT IN THE VICINITY FERROELECTRIC PHASE TRANSITION IN FERROELECTRIC TGS

The results of a study of the optical absorption of a triglycine sulfate single crystal doped with Rhodamine 6G dye molecules in the temperature range containing the phase transition point are presented. A change in the position of the absorption band maxima was detected depending on the proximity to the phase transition temperature.

Сольватохромный эффект – смещение положения максимума полосы поглощения растворов окрашенных молекул, напр., люминофоров и красителей, в зависимости от полярности растворителя, хорошо известен химикам. Общепризнанным считается наибольшее воздействие на положение максимума полосы поглощения раствора диэлектрической проницаемости растворителя [1, 2].

Целью работы является оценка величины возможного сольватохромного эффекта в твёрдом растворе молекул органического красителя Родамин 6Ж в матрице сегнетоэлектрического кристалла ТГС $(NH_2CH_2COOH)_3{\cdot}H_2SO_4$ вблизи температуры Кюри (+49,6 ^{0}C), где значения диэлектрической проницаемости у этого сегнетоэлектрика достигают 10^5 [3].

Массовая концентрация молекул красителя в растворе, из которого был выращен кристалл ТГС, составляла 0,5 %. Оптическое поглощение кристалла регистрировались с помощью спектрофотометра СФ-46 в диапазоне температур от комнатной до +56 ^{0}C. Диэлектрическая проницаемость образца измерялась прибором Е7-24.

Спектр поглощения ТГС, легированного молекулами Родамина 6Ж, имеет две полосы поглощения с максимумами при комнатной температуре на длинах волн $\lambda_1 \approx 540$ нм и $\lambda_2 \approx 725$ нм. При повышении температуры, как видно из табл. 1, в сегнетоэлектрической фазе кристалла диэлектрическая проницаемость ε_2 в направлении полярной оси Y возрастает, при этом коротковолновый максимум оптического поглощения смещается в сторону больших длин волн, длинноволновый – в сторону более коротких длин волн. После перехода кристалла в парафазу ε_2 уменьшается, максимумы поглощения смещаются в обратную сторону – к их значениям при комнатной температуре.

Таблица 1. Температурные зависимости сольватохромного сдвига полос поглощения в легированном кристалле ТГС

T, ^{0}C	λ_1, нм	λ_2, нм	ε_2, 10^4
25	538	725	5.5
30	558	718	6.0
46	626	645	20.0
49	646	620	105.0
52	624	656	61.0
56	613	680	30.0

Таким образом, подтверждено предположение о возможности сольватохромного эффекта в окрестности температуры Кюри в сегнетоэлектриках, легированных окрашенными молекулами.

Список литературы

1. Бахшиев Н.Г. Сольватохромия: проблемы и методы. Л.: ЛГУ, 1989.

2. Беккер Г.О., Ельцов А.В. Введение в фотохимию органических соединений. Л.: Химия, 1976.

3. Цедрик М.С. Физические свойства кристаллов семейства триглицинсульфата (в зависимости от условий выращивания). Минск: Наука и техника, 1986.

А.Р. КОРНИЛИЦЫН, М. КУНЕВА[1], А.А. МОЛОЛКИН[2], А.В. СОСУНОВ

Пермский государственный национальный исследовательский университет
[1]Институт физики твердого тела Академии наук Болгарии, София, Болгария
[2]Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва

ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛНОВОДЫ В СМЕШАННЫХ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОНОКРИСТАЛЛАХ

Приведены результаты промежуточных исследований формирования оптических волноводов в новых смешанных сегнетоэлектрических монокристаллах ниобата-танталата лития X- и Z- срезов методом протонного обмена. Установлено, что характеристики оптических волноводов (глубина, показатель преломления, коэффициент диффузии) после протонного обмена существенно зависят от кристаллофизической ориентации образцов, что вероятно, обусловлено неоднородностью распределения примеси тантала вдоль полярной и неполярной осей.

A.R. KORNILICYN, M. KUNEVA[1], A.A. MOLOLKIN[2], A.V. SOSUNOV

Perm National Research State University
[1]Institute of Solid State Physics Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria
[2]National University of Science and Technology «MISIS», Moscow

OPTICAL WAVEGUIDES IN MIXED FERROELECTRIC SINGLE CRYSTALS

It was shown, the original intermediate results of studies of the formation of optical proton exchange waveguides in new mixed X- and Z-cut lithium niobate-tantalate single crystals. The characteristics of optical waveguides (depth, refractive index, diffusion coefficient) after proton exchange strong depend on the crystallophysical orientation of the samples, which is probably due to the inhomogeneity of the distribution of tantalum impurities along the polar and non-polar axes.

Новые смешанные сегнетоэлектрические монокристаллы ниобата-танталата лития привлекают внимание тем, что их физические и электрооптические свойства можно регулировать, варьируя состав кристалла [1, 2], что способствует их возможному применению для электрооптических и нелинейно-оптических устройств [3].

Целью работы является исследование характеристик оптических протонообменных волноводов в смешанных сегнетоэлектрических монокристаллах ниобата-танталата лития для задач интегральной фотоники. В качестве исследуемых образцов выступали образцы X- и Z-среза выращенные из состава исходной шихты $LiNb_{0.95}Ta_{0.05}O_3$ (LNT). В ходе прямого протонного обмена (ПО) формировался волновод со ступенчатым профилем показателя преломления (рис. 1). Из полученных характеристик (табл. 1), можно сделать следующие выводы: 1) глубина волноводов в LNT больше, чем в ниобате лития (LN) при идентичных параметрах ПО; 2) Δn_e в LNT после ПО существенно зависит от кристаллофизической ориентации образцов, что, вероятно, обусловлено неоднородностью распределения примеси тантала вдоль полярной и неполярной осей [2]; 3) происходит существенное увеличение коэффициента диффузии $D_{X,Z}$. Таким образом, смешанные монокристаллы ниобата-танталата лития имеют потенциал для разработки пассивных и активных элементов для задач фотоники.

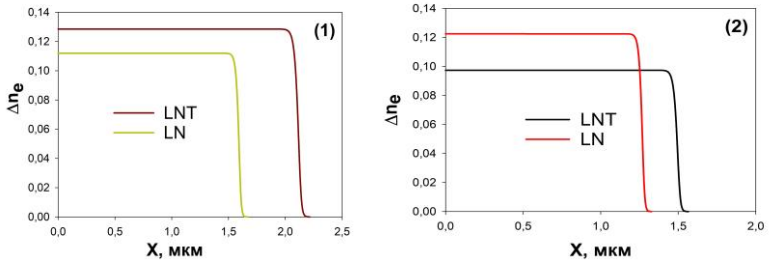


Рис. 1. Профили оптических волноводов (ПО 190 °С-2 ч.): X-срез (1) и Z-срез (2)

Таблица 1. Сравнение характеристик оптических волноводов

Образец	Срез	Δn_e	X, мкм	$D_{X,Z}$, мкм/ч
LNT	X	0.123	2.1	0.55
LN	X	0.113	1.6	0.32
LNT	Z	0.097	1.5	0.28
LN	Z	0.122	1.3	0.21

Работа выполнена при финансовой поддержке госзадания № 121101300016-2 и FSME-2023-0003.

Список литературы

1. Roshchupkin D. // Acta Crystallogr. B Struct. Sci. Cryst. Eng. Mater. 2020. V. 76. P. 1071.
2. Gureva P. // J. Appl. Cryst. 2023. V. 56. P. 539.
3. Sosunov A.V. // Photonics. 2021. V. 8. P. 571.

УДК 535(06)+004(06)

Ю.А. БЕЗУС, А.Е. РЫБАЛКА, В.В. РУМЯНЦЕВ, С.А. ФЕДОРОВ
Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина

РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕТА В НЕСОВЕРШЕННОЙ СВЕРХРЕШЁТКЕ Si-ЖК

Приведены результаты исследования особенностей распространения электромагнитных возбуждений в несовершенных 1D фотонных структурах – неидеальных многослойных системах на основе кремний/жидкий кристалл. Актуальность исследования подобных структур связана с растущими потребностями твердотельной электроники в различных слоистых структурах с заданными свойствами, а также достижениями соответствующих технологий.

J.A. BEZUS, A.E. RYBALKA, V.V. RUMYANTSEV, S.A. FEDOROV
Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering

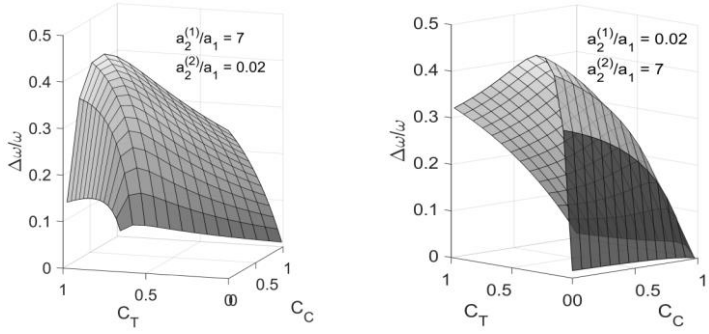
PROPAGATION OF LIGHT IN AN IMPERFECT SUPERLATTICE Si-LIQUID CRYSTAL

The results of the study of the propagation of electromagnetic excitations in imperfect 1D photonic structures – imperfect multilayer systems based on silicon/liquid crystal are presented. The relevance of the study of such structures is associated with the growing needs of solid-state electronics in various layered structures with specified properties, as well as the achievements of relevant technologies.

В настоящее время в связи с растущими потребностями твердотельной электроники в различных слоистых структурах с заданными свойствами, а также достижениями технологий, позволяющих выращивать тонкие плёнки методом эпитаксии из молекулярных пучков, изучению распространения электромагнитных волн в тонких плёнках и идеальных слоистых кристаллических средах (в частности, на основе кремния (Si) и жидкого кристалла (ЖК)) уделяется достаточно много внимания. Дальнейшее развитие теории слоистых структур требует рассмотрения более сложных систем – сверхрешёток с инородными слоями.

В настоящей работе представлены результаты исследования распространения электромагнитного возбуждения вдоль нормали к слоям несовершенной двухподрешёточной немагнитной Si-ЖК сверхрешётки. Расчёт электромагнитных возбуждений для указанных неидеальных систем может осуществляться методами, аналогичными используемыми для нахождения квазичастичных возбуждений (электронных, фононных и

других) в топологически упорядоченных неидеальных кристаллах. Распространённым методом расчёта в таких случаях является приближение виртуального кристалла, которое заключается в замене конфигурационно зависимых параметров гамильтониана задачи на усреднённые их значения [1]. В данной работе предполагается, что Si-слои случайным образом заменяются на ЖК-слои, а слои второй (ЖК) подрешётки варьируются по толщине. Для Si: $\varepsilon_1 = 11.7$, в качестве нематического ЖК взято соединение 4-бутил-4'-метоксиазоксибензол с $\varepsilon_\perp = 2.4$ [2]. Исследована трансформация энергетического спектра данной структуры, обусловленная вариацией слоёв как по составу, так и по толщине. На рис. 1 приведены поверхности, отражающие зависимость относительной ширины $\Delta\omega/\omega$ нижайшей запрещённой энергетической зоны исследуемого неидеального многослойника от концентрации C_C, C_T структурных дефектов.



а *б*

Рис. 1. Зависимость $\Delta\omega/\omega$ неидеальной 1D-сверхрешётки от концентраций примесных слоёв по составу (*а*) и толщине (*б*)

Из сравнения графиков следует, что важен фактор различия толщин основного и примесного слоёв ЖК-подрешётки: чем больше эта разница, тем более немонотонными становятся поверхности, вплоть до появления пиков максимума при соответствующих значениях C_T (для различных концентрации C_C примесных слоёв в Si-подрешётке) [1].

Список литературы

1. Rumyantsev V.V., et.al. // Physica B: Condensed Matter. 2022. V. 629. P. 413667.

2. Шабанов В.Ф. и др. Оптика реальных фотонных кристаллов. Жидкокристаллические дефекты, неоднородности. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005.

В.А. ХАЛЯПИН[1,2], А.Н. БУГАЙ[3]
[1]Калининградский государственный технический университет
[2]Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград
[3]Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

РЕЖИМЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ФИЛАМЕНТОВ В ВОЗДУХЕ

Проведено аналитическое исследование динамики пространственно-временных импульсов, распространяющихся в воздухе в области аномальной дисперсии групповой скорости.

V.A. KHALYAPIN[1,2], A.N. BUGAY[3]
[1]Kaliningrad State Technical University
[2]Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad
[3]Joint Institute of Nuclear Researches, Dubna

MODES OF FILAMENT DISTRIBUTION IN THE AIR

An analytical study of the dynamics of space-time pulses propagating in the air in the region of anomalous group velocity dispersion was carried out

В настоящей работе предложен подход описания динамики оптических импульсов, распространяющихся в области прозрачности воздуха. Соответствующее уравнение, описывающее однонаправленное распространение сигнала (без учёта ионизации), имеет вид

$$\frac{\partial E(z,r,\tau)}{\partial z} - \frac{c}{2}\int_0^\infty \Delta_\perp E(z,r,\tau-\tau')\,d\tau' + \\ + \frac{2\pi}{c}\frac{\partial}{\partial \tau}\left(\int_0^\infty \chi(\tau')E(z,r,\tau-\tau')\,d\tau' + \int_0^\infty R(\tau')E^2(z,r,\tau-\tau')\,d\tau'\right) = 0, \qquad (1)$$

Здесь E – электрическое поле, z – ось, вдоль которой распространяется сигнал, $\tau = t - z/c$, r – поперечная координата, $\chi(\tau)$ – функция отклика, связанная преобразованием Фурье с линейной восприимчивостью среды $\chi(\omega)$, $R(\tau)$ – нелинейно-оптический отклик среды [1]. Электрическое поле можно представить следующим образом

$$E(z,r,\tau)=\frac{1}{2}\psi(z,r,\tau)\exp\left[i\left(k(\omega_0)z-\omega_0\tau\right)\right]+c.c., \quad (2)$$

где $k(\omega_0)$ – волновое число на центральной частоте сигнала ω_0. Подставляя (2) в (1), можно получить уравнение для ψ. При этом мы не используем приближение медленно меняющейся огибающей. Будем считать, что условие синхронизма, обеспечивающее эффективную генерацию гармоник не выполняется и соответствующими эффектами мы будем в дальнейшем пренебрегать.

Анализ динамики параметров сигнала проводится на основе метода моментов [2] с пробной функцией

$$\psi=B\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\tau-T}{\tau_p}\right)^2-\frac{1}{2}\left(\frac{r}{R}\right)^2+i\left(\phi+\Omega(\tau-T)-C\frac{(\tau-T)^2}{2\tau_p^2}-\frac{\varepsilon r^2}{2R^2}\right)\right], \quad (3)$$

где B – амплитуда сигнала, R – параметр, пропорциональный радиусу сигнала, ε – описывает кривизну волновых поверхностей, $2\tau_p$ – величина, пропорциональная длительности сигнала, C – модуляция частоты, ϕ – фазовая добавка, Ω – смещение частоты, T – добавка к групповой скорости. Все параметры зависят от координаты z. Моменты импульса определим согласно работе [2]. Дифференцируя выражения для моментов по координате z и используя уравнение для функции ψ, можно получить систему уравнений на параметры импульса.

Одно из окон прозрачности воздуха, в котором спектр импульса лежит в области аномальной дисперсии групповых скоростей, принадлежит диапазону λ = 3.8 - 4.1 мкм. Длины волн этого диапазона лежат близко к длине волны, соответствующей резонансному переходу молекулы углекислого газа [3] λ_1 = 4.2 мкм. В связи с этим необходимо рассматривать новый параметр $2\pi c\tau_p/(\lambda_1-\lambda)$ и полное уравнение (1).

Список литературы

1. Желтиков А.М. // УФН. 1965. Т. 181. № 1. С. 33-58.
2. Santhanam J. // Opt.Commun. A. 2003. V. 222. P. 413-420.
3. Voronin A.A., Zheltikov A.M. // Scientific Reports. 2017. V. 7. P. 46111.

УДК 535(06)+004(06)

Н.И. ПЕТРОВ
Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва

ФОКУСИРОВКА ЧАСТИЧНО-КОГЕРЕНТНЫХ БЕССЕЛЬ-КОРРЕЛИРОВАННЫХ ПУЧКОВ СВЕТА ГРАДИЕНТНОЙ ЛИНЗОЙ

Исследована непараксиальная фокусировка вихревых частично-когерентных Бессель-коррелированных пучков градиентной линзой с помощью разложения поля падающего пучка по когерентным модам и квантово-механического операторного метода. Проанализировано влияние когерентности и апертуры падающего пучка на фокусировку. Показано, что частично когерентный пучок может быть сфокусирован в пятно меньшего размера, чем когерентный свет.

N.I. PETROV
Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of RAS, Moscow

FOCUSING OF PARTIALLY COHERENT BESSEL-CORRELATED BEAMS BY A GRADED-INDEX LENS

The nonparaxial focusing of partially coherent Bessel-correlated beams carrying vortices by a graded-index lens is investigated using the decomposition of the incident field into coherent modes and the quantum mechanical operator method. The influence of the coherence state and the incident beam aperture on tight focusing is analyzed. It is shown that a partially coherent Bessel-correlated beam can be focused into a spot of smaller size than coherent light.

Когерентные свойства полей необходимо учитывать во многих задачах распространения волн в свободном пространстве и в неоднородных средах [1]. Это связано с тем, что реальные источники (лазеры, светодиоды и другие) генерируют частично-когерентное излучение, а чисто когерентные источники, как правило, не реализуются на практике.

В настоящей работе мы исследуем влияние непараксиальности и когерентности Бессель-коррелированных пучков на фокусирующие свойства градиентной линзы, используя квантово-механический операторный метод [2 - 4] и метод разложения падающего поля по когерентным модам [5 - 7]. Проанализированы средние размеры пятна в плоскости фокусировки и распределения напряжённости поля в осевом и радиальном направлениях вблизи плоскости фокусировки для падающих

пучков с различными размерами апертуры, радиусами когерентности и топологическими зарядами.

На рис. 1 представлены распределения интенсивностей сфокусированного Бессель-коррелированного пучка с радиусом $a_0 = 25$ мкм, различными топологическими зарядами $l = 0$ (*а*, *б*) и $l = 1$ (*в*, *г*) и радиусами когерентности r_0 в плоскости фокуса z_f.

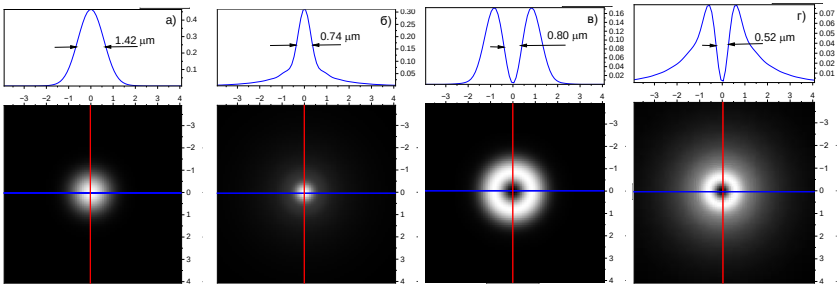


Рис. 1. Распределение интенсивности в плоскости фокуса: $r_0 = 100$ mm, $z_f = 332$ mm (*а*); $r_0 = 10$ mm, $z_f = 324$ mm (*б*); $r_0 = 100$ mm, $z_f = 332$ mm (*в*); $r_0 = 10$ mm, $z_f = 324$ mm (*г*)

Таким образом, продемонстрирована возможность анализа непараксиального распространения и фокусировки вихревых частично-когерентных Бессель-коррелированных пучков градиентной линзой с использованием метода разложения поля по когерентным модам [6 - 8].

Результаты могут быть полезны для улавливания микрочастиц, а также могут представлять интерес для передачи информации, оптической визуализации и волоконно-оптической связи.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Государственного задания FFNS-2022-0009.

Список литературы

1. Mandel L., Wolf E. Optical coherence and quantum optics. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
2. Petrov N.I. // Opt. Exp. 2001. V. 9. P. 658-673.
3. Petrov N.I. // Fibers. 2021. V. 9 (6). P. 34.
4. Petrov N.I., Petrova G.N. // Opt. Exp. 2017, V. 25 (19). P. 22545-22564.
5. Petrov N.I. // Photonics. 2022. V. 9. P. 162.
6. Petrov N.I. // Photonics. 2023. V. 10. P. 857.
7. Petrov N.I. // Opt. Lett. 2023. V. 48. No. 22. P. 6048-6051.
8. Hyde IV M.W., Korotkova O., Spencer M.F. // J. Opt. 2023. V. 25. P. 035606.

УДК 535(06)+004(06)

Д.В. МАКСИМОВ, А.А. БОГУСЛАВСКАЯ-ГАПЕШИНА,
С.И. ЯКУБОВ, С.И. ХАЛИЛОВ, М.В. БРЕЦЬКО
Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ОУМ АСТИГМАТИЧЕСКИХ СТРУКТУРИРОВАННЫХ ПУЧКОВ ЛАГЕРРА–ГАУССА

Разработан и экспериментально воплощён ABCD матричный формализм для описания структурированных преобразований и орбитального углового момента структурированных пучков Лагерра–Гаусса в астигматической оптической системе, содержащей одну цилиндрическую линзу. Показано, что матричный формализм не только хорошо согласуется с методом интегральных астигматических преобразований, но и значительно расширяет область его применения.

D.V. MAKSIMOV, A.A. BOGUSLAVSKAYA-GAPESHINA,
S.I. YAKUBOV, S.I. KHALILOV, M.V. BRETSKO
V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

OAM TRANSFORMATION OF ASTIGMATIC STRUCTURED LAGUERRE -GAUSSIAN BEAMS

The ABCD matrix formalism for describing structured transformations and orbital angular momentum of structured Laguerre–Gaussian beams in an astigmatic optical system containing a single cylindrical lens is developed and experimentally implemented. It is shown that the matrix formalism not only agrees well with the method of integral astigmatic transformations, but also considerably extends the area of its application.

Структурированные пучки обладают высокой устойчивостью к различным воздействиям и обладают способностью к самовосстановлению при их распространении [1]. В данной работе мы сфокусируемся на проблеме устойчивости таких пучков к внешним возмущениям, в частности, рассматривая устойчивость структурированных Лагерра–Гаусса (сЛГ) пучков, по отношению к простому астигматизму, при распространении в свободном пространстве, используя метод ABCD матриц.

Комплексную амплитуду сЛГ пучка, можно представить в виде выражения [2]:

$$sLG_{n,\ell}(\mathbf{r},\varepsilon,\theta)=\frac{(-1)^n}{2^{2n+3\ell/2}n!}\sum_{k=0}^{2n+\ell}(2i)\varepsilon_k(\varepsilon,\theta)P_k^{(n+\ell-k,n-k)}(0)HG_{2n+\ell-k,k}(\mathbf{r}) \quad (1)$$

где $\mathbf{r}=(x,y)$, $P_k^{(n+\ell-k,n-k)}(\square)$ – многочлен Якоби, $HG_{2n+\ell-k,k}(\mathbf{r})$ – моды ЭГ. Для управления амплитудой и фазой пучка внесём под знак суммы (1) множитель:

$$\varepsilon_k(\varepsilon,\theta)=1+\varepsilon e^{ik\theta}. \quad (2)$$

Пример теоретического и экспериментального распределения интенсивности такого пучка показаны на рис. 1 [2].

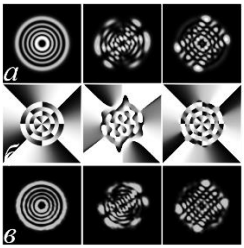


Рис. 1. Теоретические (*а*) и экспериментальные (*в*) картины интенсивности и фазы (*б*) сЛГ-пучка для амплитудного параметра $\varepsilon = 1$ и некоторых значений фазового параметра θ

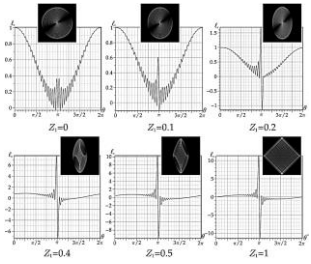


Рис. 2. Осциляции ОУМ $\ell_2(\theta)$ при варицации θ-управляющего параметра асЛГ пучка с $n = 20$, $\ell = 1$, $\varepsilon = 1$ на различных длинах пучка Z_1, выноски: картины интенсивности для первого всплеска ОУМ

С помощью ABCD матриц был рассчитан комплексный параметр пучка, и получено распределение интенсивности после астигматического преобразования (рис. 2).

Нами продемонстрирована эффективность метода ABCD матриц, которая расширила математическое описание астигматических преобразований сЛГ пучков.

Список литературы

1. Soifer V.A. Korotkova O., Khonina S.N., Shchepakina E.A. Vortex beams in turbulent media: Review // Computer Optics. 2016. V. 40 (5). P. 605-624.

2. Воляр А.В., Абрамочкин Е.Г., Брецько М.В., Акимова Я.Е., Егоров Ю.А. Может ли радиальное число вихревых мод управлять орбитальным угловым моментом? // Компьютерная оптика. 2022. Т. 46. № 6. С. 853-863.

А.А. БОГУСЛАВСКАЯ-ГАПЕШИНА, Д.В. МАКСИМОВ,
С.И. ЯКУБОВ, С.И. ХАЛИЛОВ, М.В. БРЕЦЬКО
Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь

ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ СТРУКТУРА ВЕКТОРНЫХ СТРУКТУРИРОВАННЫХ ПУЧКОВ ЛАГЕРРА–ГАУССА

В данной работе проведены эксперименты, направленные на формирование структурированных векторных пучков Лагерра–Гаусса с использованием пространственного модулятора света. Экспериментально была продемонстрирована способность измерения поляризационной структуры данных пучков с использованием дифференциального Стокс-поляриметра. Полученные измерительные данные по распределению поляризации успешно соответствуют теоретическим расчётам, что подтверждает эффективность и точность данного метода в анализе оптических структур.

A.A. BOGUSLAVSKAYA-GAPESHINA, D.V. MAKSIMOV,
S.I. YAKUBOV, S.I. KHALILOV, M.V. BRETSKO
V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

POLARIZED STRUCTURE OF VECTOR STRUCTURED LAGUERRE–GAUSSIAN BEAMS

In this work we present a formation of structured Laguerre–Gaussian vector beams using a spatial light modulator. The ability to measure the polarization structure of these beams using a differential Stokes polarimeter was experimentally demonstrated. The obtained measurement data on the polarization distribution successfully correspond to theoretical calculations, which confirms the effectiveness and accuracy of this method in the analysis of optical structures.

В данной работе мы предлагаем рассмотреть метод формирования структурированных Лагерра–Гаусса (сЛГ) векторных пучков, основанный на применении пространственного модулятора света [1]. На ПЗС-матрице пространственного модулятора света типа Thorlabs EXULUS-4K 1/M были записаны две голограммы линейно поляризованных компонент структурированного пучка. В отличие от чисто фазовой голограммы, голограмма учитывает не только изменение фазы, но и распределение интенсивности, что существенно улучшает качество восстановленного пучка. Далее два восстановленных комплексно-сопряжённых пучка

проходят через поляризатор, а затем через λ/2-пластинки, формирующие в обоих пучках ортогональные линейные поляризации.

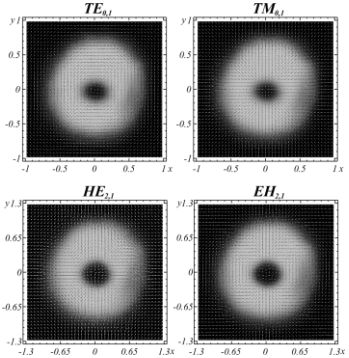


Рис. 1. Экспериментально полученная поляризационная структура TE, TM, HE и EH мод

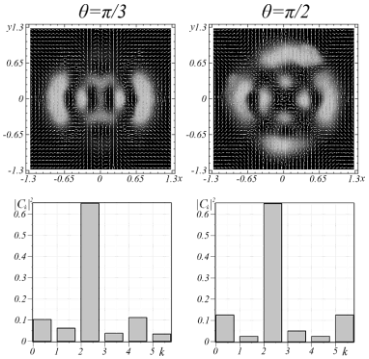


Рис. 2. Экспериментально полученная карта распределения поляризации векторного сЛГ пучка для $(n,\ell)=(5,1)$ и спектры ЭГ мод сЛГ пучка в $\hat{\mathbf{x}}$ поляризационных компонентах

На светоделительном кубике совмещаются ортогонально поляризованные пучки в один векторный пучок. Чтобы каждая мода пучка содержала оптические вихри в явной форме, необходимо перейти в циркулярно поляризованный базис. Поляризационная структура пучка (рис. 1) воспроизводилась с помощью Стокс-поляриметра, содержащего анализатор и λ/4-пластинку [2]. Векторная структура поля на фоне распределения интенсивности воспроизводилась фотодетектором типа CMOS Michrome 20. Полученные экспериментально картины распределения поляризации (рис. 2) успешно соответствуют теоретическим расчётам, что подтверждает эффективность и точность данного метода в анализе оптических структур.

Список литературы

1. Rosales-Guzmán C., Bhebhe N., Forbes A. Simultaneous generation of multiple vector beams on a single SLM // Optics Express. 2017. V. 25, No. 21. P. 25697.

2. Фадеева Т.А., Воляр А.В. Дифференциальный Поляриметр. Патент № 65939 Украины. Заявитель и патентообладатель Таврический национальный университет, опубл.15.04.04, бюл. № 4.

УДК 535(06)+004(06)

Н.И. ПЕТРОВ, Ю.М. СОКОЛОВ, В.В. СТОЯКИН,
В.А. ДАНИЛОВ, В.В. ПОПОВ[1]
Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва
[1]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

УГЛОВОЙ СДВИГ ИМБЕРТА–ФЕДОРОВА ПРИ ПЛАЗМОННОМ РЕЗОНАНСЕ В СУБВОЛНОВЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЁТКАХ

Приводятся результаты измерений углового сдвига Имберта–Федорова при возбуждении поверхностного плазмонного резонанса (ППР) в металлических субволновых решётках. Показано, что линейно поляризованный пучок пространственно разделяется на два циркулярно-поляризованных отражённых пучка с противоположным знаком спиральности.

N.I. PETROV, Yu.M. SOKOLOV, V.V. STOIAKIN,
V.A. DANILOV, V.V. POPOV[1]
Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of RAS, Moscow
[1]Lomonosov Moscow State University

ANGULAR IMBERT–FEDOROV SHIFT NEAR THE SURFACE PLASMON RESONANCE IN SUBWAVELENGTH GRATINGS

The results of measurements of the Imbert–Fedorov angular shift at excitation of the surface plasmon resonance in metal subwavelength gratings are presented. It is shown that a linearly polarized beam is spatially divided into two circularly polarized reflected beams with the opposite sign.

Пространственные смещения отражённого пучка на границе раздела двух сред относительно падающего представляет собой хорошо известный сдвиг Гуса–Хенхен (ГХ) в плоскости падения [1]. Заметное увеличение углового смещения ГХ можно наблюдать для сильно сфокусированного пучка, отражённого диэлектрической границей раздела вблизи угла Брюстера [2]. Известен также сдвиг Имберта–Федорова (ИФ) отражённого пучка в перпендикулярном направлении к плоскости падения циркулярно-поляризованного пучка [3, 4]. В [5] сдвиг ИФ показан для сагиттальных лучей, распространяющихся в градиентном световоде. В [6, 7] показаны положительные и отрицательные сдвиги ГХ для отражённых пучков от субволновых решёток вблизи поверхностного плазмонного резонанса.

В настоящей работе исследован угловой сдвиг ИФ при возбуждении ППР в субволновой никелевой дифракционной решётке с периодом $\Lambda = 400$ нм и глубиной $h = 80$ нм. На рис. 1 приводятся изображения отражённых пучков (*а* - *в*) и их профили (*г* - *е*). Расстояние между дифракционной решёткой и камерой $z = 17$ см. ППР наблюдается при угле падения пучка 33.46 °.

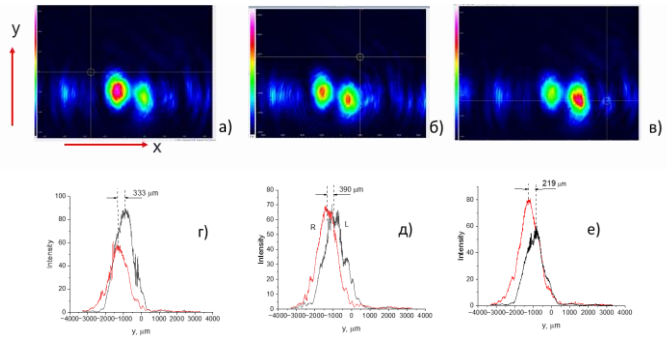


Рис. 1. Профили интенсивностей отражённого пучка:
$\theta_i = 33.43$ ° (*а*, *г*); $\theta_i = 33.46$ ° (*б*, *д*); $\theta_i = 33.49$ ° (*в*, *е*)

Видно, что имеют место смещения как в горизонтальном (смещение ГХ в плоскости падения), так и в вертикальном (смещение ИФ в поперечной плоскости) направлениях. При пропускании отражённого пучка через фильтр определенной циркулярной поляризации одно из пятен исчезает. Это означает, что при отражении пучка происходит угловое разделение лево- и правополяризованных фотонов. Физический механизм такого разделения обусловлен спин-орбитальным взаимодействием, усиленным ППР. Таким образом, в эксперименте продемонстрирован спиновый эффект Холла для света, обусловленный влиянием спина (поляризации) на траекторию светового пучка.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Государственного задания FFNS-2022-0009.

Список литературы

1. Goos F.. Hänchen H. // Annalen der Physik. 1947. V. 436. P. 333-346.
2. Petrov N.I. // J. Mod. Opt. 2005. V. 52. P. 1545-1556.
3. Федоров Ф.И. // Доклады АН СССР. 1955. Т. 105. № 3. С. 465-468.
4. Imbert C. // Phys. Rev. D. 1972. V. 5. No. 4. P. 787-796.
5. Petrov N.I. // J. Opt. 2013. V. 15. P. 014011.
6. Petrov N.I., Danilov V.A., Popov V.V., Usievich B.A. // Opt. Exp. 2020. V. 28. P. 7552-7564.
7. Petrov N.I., Sokolov Yu.M., Stoiakin V.V., Danilov V.A., Popov V.V., Usievich B.A. // Photonics. 2023. V. 10. P. 180.

УДК 535(06)+004(06)

К.Н. БАРАНОВ, М.А. ГОРЛАЧ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

БИАНИЗОТРОПНЫЙ ОТКЛИК МНОГОСЛОЙНОЙ СТРУКТУРЫ С ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ОТ СЛОЯ К СЛОЮ ОСЬЮ АНИЗОТРОПИИ

На основании системы уравнений Максвелла представлено теоретическое исследование электромагнитного поля, прошедшего через многослойную структуру с поворачивающейся от слоя к слою осью анизотропии. Показано, что в исследуемой структуре может возникать эффективный бианизотропный отклик. Получены эффективные параметры среды при нормальном падении плоской электромагнитной волны, такие как диэлектрическая проницаемость и хиральность. Выявлено, что при прохождении линейно поляризованного света через исследуемую многослойную структуру происходит поворот плоскости поляризации.

K.N. BARANOV, M.A. GORLACH
ITMO University, Saint-Petersburg

BIANISOTROPIC RESPONSE OF MULTILAYERED STRUCTURE WITH ROTATING ANISOTROPY AXIS

Based on the system of Maxwell's equations, we analyze theoretically the electromagnetic field passing through a multilayer structure with anisotropy axis rotating from layer to layer. It is shown that a bianisotropic response can occur in the investigated structure. Effective parameters of the medium at normal incidence of a plane electromagnetic wave, such as dielectric permittivity and chirality, are obtained. It is revealed that when linearly polarized light passes through the investigated multilayer structure, the polarization plane is rotated.

Метаматериалы – это искусственно созданные материалы с уникальными свойствами [1]. Наиболее легко воспроизводимыми структурами являются многослойные метаматериалы. Для синтеза таких структур, как правило, используется метод напыления [2]. Многими группами были исследованы системы, состоящие из изотропных слоёв. Однако усложнение структуры может открывать новые возможности. Например, недавнее исследование [3] показывает, что намагниченные анизотропные слои предоставляют возможность получить эффективный аксионный отклик. Таким образом, изучение структуры, состоящей из анизотропных слоёв, может привести к выявлению интересной физики,

допускающей к тому же аналитическое описание. Поэтому главная задача, на решение которой направлен данный проект, заключается в разработке теоретической модели, позволяющей детально описать поведение плоской электромагнитной волны, падающей на структуру, состоящую из анизотропных слоёв, оси анизотропии которых повернуты друг относительно друга. Поворот оси анизотропии осуществляется от слоя к слою постепенно, что создаёт периодическую фотонную структуру с необычными электромагнитными свойствами.

При получении значений электромагнитных полей в рассматриваемой среде были выведены следующие эффективные параметры:

$$\varepsilon_{эфф} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} + \left(\frac{(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)q}{2b} \right)^2, \quad (1)$$

$$\chi = -\left(\frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{2} \right)^2 \frac{q^3}{b^3}, \quad (2)$$

где $\varepsilon_{эфф}$ – эффективная диэлектрическая проницаемость, χ – эффективная хиральность, ε_1 и ε_2 – компоненты тензора диэлектрической проницаемости первого слоя, q – волновое число в вакууме, b – с точностью до 2π обратная периоду структуры величина.

На основании полученных эффективных параметров была определена зависимость угла поворота плоскости поляризации (θ) от пройденного светом расстояния z:

$$\theta = \left(\frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{2} \right)^2 \frac{q^4}{4(\pi/a)^3} z, \quad (3)$$

где a – период структуры.

Таким образом, было получено, что вращение плоскости поляризации плоской электромагнитной волны происходит линейно с увеличением расстояния. Стоит отметить, что полученная зависимость является слабой, поскольку был рассмотрен случай, когда длина волны падающего света намного превосходит период структуры.

Исследование было выполнено при финансовой поддержке гранта НИР МиА ФТ МФ Университета ИТМО.

Список литературы

1. Liu Y., et al. // Chem. Soc. Rev. 2011. V. 40. P. 2494.
2. Sakurai A. et al. // ACS Cent. Sci. 2019. V. 5. P. 2374.
3. Shaposhnikov L., et al. // Physical Review B. 2023. V. 108. P. 115101.

УДК 535(06)+004(06)

В.С. ТЮТЬКОВ, Е.А. ВАШУКЕВИЧ
Санкт-Петербургский государственный университет

ФОРМИРОВАНИЕ ПЕРЕПУТЫВАНИЯ В ГИБРИДНЫХ АТОМНО-ПОЛЕВЫХ ВЫСОКОРАЗМЕРНЫХ СИСТЕМАХ ДЛЯ КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ В ДИСКРЕТНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ

Двухкудитные логические квантовые вентили являются неотъемлемой частью квантовых вычислений, исследование методов их реализации является важной задачей для различных квантово-оптических и информационных приложений. В данной работе описана гибридная атомно-полеввя система в терминах логических состояний кубитов и кудитов, а также изучены нелокальные и перепутывающие операции в протоколе квантового неразрушающего взаимодействия.

V.S. TYUTKOV, E.A. VASHUKEVICH
Saint-Petersburg State University

ENTANGLEMENT FORMATION IN HYBRID ATOMIC-FIELD HIGH-DIMENSIONAL SYSTEMS FOR QUANTUM COMPUTING IN DISCRETE VARIABLES

Two-qudit entangling logic quantum gates have become an integral part of quantum computing, so the study of methods for their implementation seems to be an important problem for various quantum optical and information applications. In this work we describe the hybrid atomic-field system in terms of the logical states of qubits and qudits, and also study non-local and entangling operations in the protocol of quantum non-demolition interaction.

Для реализации схемной модели квантовых вычислений, то есть выполнения произвольной унитарной вычислительной процедуры, необходимо иметь возможность реализации операций из универсального набора: операцию над одним квантовым битом (кубитом), а также двухкубитной перепутывающей операцию. В настоящее время подробно исследуются фотонная [1], атомная [2], сверхпроводящая [3] и многие другие платформы. Использование квантовых степеней свободы фотонов для вычислений обладает рядом примечательных достоинств, в частности, большое время декогеренции, большая скорость передачи квантовых состояний, а также разработанные методы генерации, манипулирования и детектирования излучения. Однако, двухкубитная операция между фотонными кубитами сложна в реализации. Использование атомов,

напротив, позволяет относительно легко организовывать взаимодействие двух кубитов, но требуются дополнительные меры по их охлаждению. Всё это определяет сложность в масштабировании квантовых вычислительных схем. Одним из подходов к решению этой проблемы является использование гибридной системы атомы-поле. Как показано в [4], в такой системе, используемой для построения кубитов, возможно параллельно работать с большим числом кубитов и выполнять нелокальные операции.

Решение проблемы масштабируемости может также заключаться в использовании высокоразмерных квантовых объектов – кудитов, которые в отличии от кубитов обладают более чем двумя базисными логическими состояниями. Существует ряд примеров экспериментальной реализации кудитов, в частности, в сверхпроводящих и фотонных системах [5, 6]. Поиск способов реализации для кудитов операций из универсального набора является актуальной задачей, хотя предложены методы проведения однокудитных операций при использовании в качестве ресурса пространственных мод света с орбитальным угловым моментом [7, 8], эффективной перепутывающей операции остаётся открытым вопросом.

В данной работе рассмотрена гибридная атомно-полевая система в терминах логических состояний кубитов и кудитов (рис. 1), исследованы нелокальные и перепутывающие операции в протоколе квантового неразрушающего взаимодействия.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-22-00022), и Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС» (Грант 22-1-4-20-1).

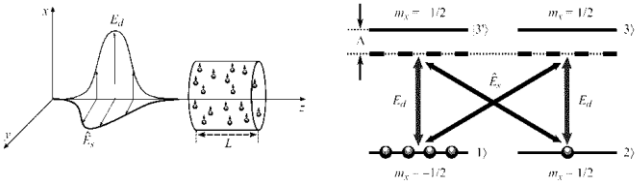


Рис. 1. Геометрия квантового взаимодействия управляющего и квантового полей с атомным ансамблем, а также схематическое изображение атомных уровней

Список литературы

1. Duan L.M., Kimble H.J. // Physical Review Letters. 2004. V. 92. No. 12. P. 127902.
2. Cohen S.R., Thompson J.D. // PRX Quantum. 2021. V. 2. No. 3. P. 030322.
3. Arute F., et al. // Nature. 2019. V. 574. No. 7779. P. 505-510.
4. Башмакова Е.Н. и др. // Оптика и спектроскопия. 2023. Т. 131. № 7.
5. Goss N., et al. // Nature communications. 2022. V. 13. No. 1. P. 7481.
6. Nisbet-Jones P.B.R., et al. // New Journal of Physics. 2013. V. 15. No. 5. P. 053007.
7. Vashukevich E.A., et al. // Laser Physics Letters. 2022. V. 19. No. 2. P. 025202.
8. Vashukevich E.A. , et al. // Physical Review A. 2020. V. 101. No. 3. P. 033830.

УДК 535(06)+004(06)

И.В. ДЗЕДОЛИК
Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь

ПЛАЗМОННЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Теоретически исследовано распространение плазмонных импульсных сигналов, возбуждённых в углеродных нанотрубках (УНТ) ультракороткими лазерными импульсами. Предложены схемы плазмонных логических элементов «НЕ» и «ИЛИ» на основе УНТ, представляющие полный функциональный базис для бинарной логики.

I.V. DZEDOLIK
V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

PLASMONIC LOGIC GATES BASED ON CARBON NANOTUBES

The propagation of plasmonic pulsed signals excited by ultrashort laser pulses in carbon nanotubes (CNTs) is theoretically studied. Schemes of plasmonic logic gates “NOT” and “OR” based on CNTs representing a complete functional basis for binary logic are proposed.

Плазмонная схемотехника показывает отличные результаты в области повышения несущих частот импульсных сигналов вплоть до оптических [1, 2]. Но существующие плазмонные структуры – модуляторы, вентили, логические элементы имеют относительно большие размеры порядка сотен нанометров, что неприемлемо в современной схемотехнике. Помимо этого, металлические плазмонные волноводы и элементы плазмонных схем обладают большими потерями энергии при нагреве и из-за рассеяния сигнала на неоднородностях.

Углеродные нанотрубки (УНТ), в которых могут возбуждаться поверхностные плазмонные волны, имеют существенные преимущества перед металлическими плазмонными волноводами: высокий уровень проводимости и минимальные потери на нагрев, а также гораздо меньшие поперечные размеры – около 1 нм [3]. Помимо этого, при возбуждении сигналов электромагнитной волной на телекоммуникационной частоте длина волны поверхностных мод в УНТ на порядок меньше, чем в плазмонных волноводах, что позволяет реализовывать элементы плазмонной схемотехники на основе УНТ с минимальными размерами.

Целью работы является теоретическое исследование распространения плазмонного сигнала в УНТ, также предложены схемы плазмонных логических элементов на УНТ. В результате распространения плазмонных сигналов по различным ветвям из нанотрубок, представляющих интерферометры типа Маха–Цендера [4], возможно создать полностью плазмонный логический элемент «НЕ». Плазмонный логический элемент «ИЛИ» реализуется на основе Y-разветвителя из УНТ.

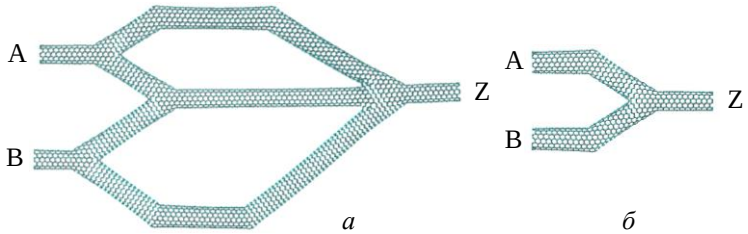


Рис. 1. Плазмонные логические элементы на основе углеродных нанотрубок: «НЕ» (*а*), «ИЛИ» (*б*); A и B – входные порты, Z – выходной порт

В логическом элементе «НЕ» (рис. 1*а*) происходит инверсия сигнала, введённого в порт *A*. Для суммарного сигнала на выходе элемента «НЕ» *Z* при соответствующей разности фаз сигнала, введённого в порт *A*, и синхроимпульса, введённого в порт *B*, имеет место деструктивная интерференция, сигнал в порту *Z* отсутствует, на выходе элемента возникает логический ноль. При отсутствии сигнала в порту *A* на выходе *Z* элемента «НЕ» имеет место логическая единица, генерируемая синхроимпульсом. Принцип функционирования логического элемента «ИЛИ» (рис. 1*б*) основан на беспрепятственном прохождении импульсных сигналов, введённых в порт *A* или в порт *B* Y-разветвителя на основе УНТ.

Плазмонные логические элементы «НЕ» и «ИЛИ» на основе УНТ представляют полный функциональный базис для бинарной логики.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 19-72-20154, https://rscf.ru/project/19-72-20154.

Список литературы

1. Майер С.А. Плазмоника: теория и приложения. М.-Ижевск: НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”, 2011.

2. Дзедолик И.В., Михайлова Т.А., Томилин С.В. Плазмоника микро- и наноструктур. От теории к эксперименту. Симферополь: ПОЛИПРИНТ, 2022.

3. Dzedolik I.V., Tomilin S.V., Polulyakh S.N., Yakubenko B.M. // SPbPU J. Phys. Math. 2023. V. 16(4).

4. Kumar A., Kumar S. // Optik. 2014. V. 125. P. 5764.

Р. СИНГХ[1], А.Е. ТЕРЕТЁНКОВ[2]
[1]Независимый исследователь, Домодедово
[2]Математический институт им. В.А. Стеклова РАН, Москва

КВАНТОВАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ СЖАТОГО СОСТОЯНИЯ КОТА ШРЕДИНГЕРА

Теоретически показано, что квантовую чувствительность (ортогональность) сжатого состояния кота Шредингера относительно не сжатого состояния, можно достичь при небольшом значении оператора сдвига. Для реализации сжатия состояния кота Шредингера используется параметрический процесс в нелинейно-оптическом кристалле. Для визуализации сжатого состояния кота Шредингера со сдвигом и без вычислены значения функций Вигнера.

R. SINGH[1], A.E. TERETENKOV[2]
[1]Independent researcher, Domodedovo
[2]Steklov Mathematical Institute of the RAS, Moscow

QUANTUM SENSTIVITY OF SQUEEZED SCHRODINGER CAT STATE

Theoretically it is shown that the quantum sensitivity (orthogonality) of the squeezed state of the Schrodinger cat relative to the non-squeezed state can be achieved with a small value of the displacement operator. For realization of squeezing of Schrodinger cat state, a parametric process in a nonlinear optical crystal is used. To visualize the squeezed state of the Schrodinger cat with and without a displacement, the values of the Wigner functions are calculated.

В последнее время активно исследуются состояния котов Шредингера для задач квантовой информатики [1. 2]. Это связано с тем, что кубиты на основе состояния котов Шредингера можно создать с помощью одной моды. Но для эффективного создания состояния котов Шредингера необходимо, чтобы они содержали большое число средних фотонов (> 2). Это позволяет различать макроскопические состояния друг от друга. Для генерации состояния кота Шредингера используются различные схемы. Например, на основе квадратичной, керровской среды, линейной оптики и кубической фазы [3 - 5].

В данной работе теоретически исследуется процесс усиления (роста среднего числа фотонов) состояния кота Шредингера в случае, когда основная мода находится в состоянии кота Шредингера и мода второй

гармоники не истощается. Для реализации данной задачи используется параметрический процесс в нелинейном оптическом кристалле с квадратичной нелинейностью χ^((2)). В реализации параметрического процесса основная мода усиливается, а также сохраняется интерференция между двумя макроскопическими состояниями (рис. 1). Отметим, что на этапе реализации параметрического процесса состояния кота Шредингера становятся сжатыми (рис. 1).

Квантовая чувствительность F(τ,|δ|^2) [6] сжатого когерентного состояния кота Шредингера (SSCS) становится почти ортогональной (F(0.5,0.09) ≈ 0, (рис. 2), если сдвинуть SSCS относительно другого SSCS с помощью оператора сдвига D(δ). Квантовая чувствительность вычисляется с помощью

$$F(\tau,|\delta|^2)=|\langle SSCS \mid D(\delta) \mid SSCS\rangle|^2,$$

SSCS может стать хорошим кандидатом для задач квантовой сенсорики, когда необходимо различать близко расположенные состояния.

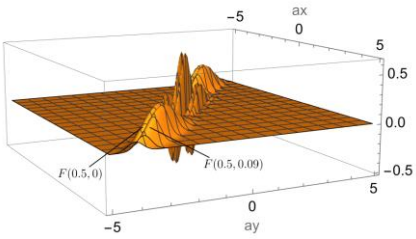


Рис. 1. Визуализация функции Вигнера для сжатого состояния кота Шредингера без сдвига (|δ|^2 = 0) и со сдвигом (|δ|^2 = 0.09) в случае, когда накачка моды a_2 неистощимая, в начальный момент времени мода a_1 находится в состоянии кота Шредингера с $|\alpha_{10}|^2 = 5$ и $\arg(\alpha_{10}) = 0$. τ = 0.5

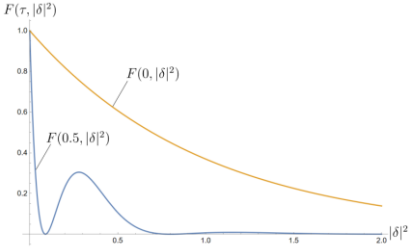


Рис. 2. Зависимость функции квантовой чувствительности от сдвига |δ|^2 в случае, когда накачка моды a^_2 неистощимая, в начальный момент времени мода a_1 находится в состоянии кота Шредингера с $|\alpha_{10}|^2 = 5$ и $\arg(\alpha_{10}) = 0$. τ = 0.5

Список литературы

1. Vlastakis B., Kirchmair G., Leghtas Z., et al. // Science. 2013. V. 342. Iss. 6158. P. 607.
2. Mirrahimi M. // Comptes Rendus Physique. 2016. V. 17. Iss. 7. P. 778.
3. Nikitin S.P., Masalov A.V. // Quantum Optics: Journal of the European Optical Society. Part B. 1991. V. 3 (2). P. 105.
4. Podoshvedov M.S., Podoshvedov S.A., Alodjants A.P., et al. // Vestn. Yuzhno-Ural. Gos. Un-ta. Ser. Matem. Mekh. Fiz. 2022. Vol. 14. Iss. 1. P. 77.
5. Baeva A.V., Losev A.S., Sokolov I.V. // Physics Letters A. 2023. V. 466. P. 128730.
6. Shukla A., Sanders B.C. // arXiv: 2306.13182. 2023.

УДК 535(06)+004(06)

К.Р. КУЗНЕЦОВА, А.В. БАЕВА, Е.А. ВАШУКЕВИЧ
Санкт-Петербургский государственный университет

АЛГОРИТМ ГРОВЕРА: РЕАЛИЗАЦИЯ НА КЛАССИЧЕСКОЙ И КВАНТОВОЙ СИСТЕМАХ

Рассмотрены физические системы, в которых выполняется алгоритм поиска Гровера. Представлены: классическая модель, состоящая из математических маятников, и квантовая модель, построенная на атомах. При определённых условиях обе модели дают квадратичный выигрыш во времени.

K.R. KUZNETSOVA, A.V. BAEVA, E.A. VASHUKEVICH
Saint-Petersburg State University

GROVER'S ALGORITHM: IMPLEMENTATION AND QUANTUM SYSTEMS

Presents the physical systems in which the Grover's algorithm can be implemented. We will consider two different models: the classical model consisting of mathematical pendulums and the quantum model based on atoms. Under certain conditions, both models give a quadratic gain in time.

Стремительное развитие информационных технологий привело к постоянному росту объёмов данных, которые необходимо передавать, обрабатывать и анализировать [1]. Для этих целей возникает потребность в задействовании больших вычислительных мощностей и разработке специализированных алгоритмов. Одной из актуальных задач, связанных с работой с большими данными, является задача поиска в неупорядоченных базах данных. Она является очень затратной операцией с точки зрения времени и ресурсов для классических компьютеров.

В 1996 году Ловом Гровером был предложен алгоритм [2], основанный на фундаментальных принципах квантовой механики и позволяющий осуществлять поиск элемента в неупорядоченной базе данных более эффективно в сравнении с классическими алгоритмами. Эффективность заключается в том, что для поиска нужного нам элемента p требуется выполнить не O(N) шагов, как в классическом случае, а O($\sqrt{N}$) шагов, а значит мы получаем квадратичный выигрыш во времени. Несмотря на то, что алгоритм Гровера является принципиально квантовым, позднее было показано, что существуют классические системы [3], для которых действуют алгоритмы, подобные алгоритму квантового поиска.

В данной работе мы рассмотрим систему связанных маятников (рис. 1), в которой действует классический аналог алгоритма Гровера, проанализируем время работы алгоритма. Также мы рассмотрим реальную физическую систему, в которой можно осуществить поиск с помощью квантового алгоритма Гровера.

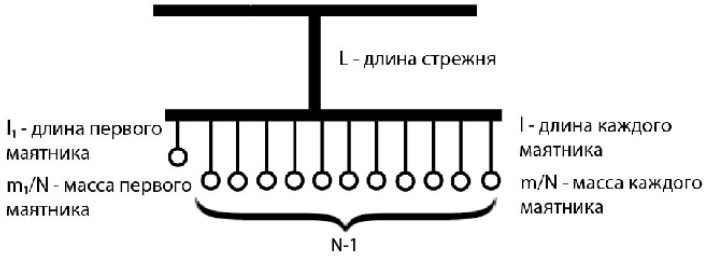


Рис. 1. Рассматриваемая модель связанных маятников

Список литературы

1. Sagiroglu S., Sinanc D. Big data: A review // 2013 International Conference on Collaboration Technologies and Systems (CTS). IEEE, 2013.

2. Grover L.K. Quantum mechanics helps in searching for needle in a haystack // Phys. Rev. Lett. 1997. V. 79. P. 325-328.

3. Grover L.K., Sengupta A.M. Classical analog of quantum search // Phys. Rev. A. 2002. V. 65. P. 032319.

П.О. ЯКУШЕНКОВ
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

САМОФОКУСИРОВКА ИЗЛУЧЕНИЯ КАК КОЛЛАПС ВОЛНОВОГО ВЕКТОРА

В данной статье предлагается подход общей теории относительности к явлению самофокусировки. Показатель преломления рассматривается, как компонента метрического тензора, а добавка к показателю преломления из-за нелинейных эффектов в области самофокусировки, как дополнительное искривление, которое компенсирует дифракционную расходимость, стягивая траектории фотонов внутрь так, что фотоны в области самофокусировки, распространяющиеся под определёнными углами, испытывают коллапс и не выходят за волноводную область.

P.O. YAKUSHENKOV
Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

SELF-FOCUSING AS THE COLLAPSE OF THE WAVE VECTOR

This article proposes a GRT approach to the phenomenon of self-focusing. The refractive index is considered as a component of the metric tensor, and the addition to the refractive index due to nonlinear effects in the self-focusing area is considered as an additional curvature that compensates diffraction divergence by pulling photon trajectories inward so that photons in the self-focusing area propagating at certain angles experience collapse and do not go beyond the waveguide region.

Идея обыграть самофокусировку, как коллапс появилась из работы про диэлектрическую проницаемость [1] и про массу-искривление [2], то есть стало понятно, какую метрику нужно писать, чтобы излучение не выходило за область самофокусировки.

В данной работе предлагается рассмотреть распространение света в веществе с точки зрения общей теории относительности и ввести эффективную метрику, такую, что $dt` = dt\sqrt{g_{00}}$, где g_{00} – компонента метрического тензора и $n = \sqrt{\varepsilon} = \sqrt{g_{00}}$, то есть скорость света не меняется, а меняется траектория в четырёхмерном пространстве за счёт увеличения пути по координате времени. В веществе из-за ε появляется дополнительное поле $4\pi\mathbf{P}$ ($\mathbf{D} = \mathbf{E} + 4\pi\mathbf{P}$) и дополнительный барьер U в уравнении Шредингера [1].

В работе [2] рассматривался случай неплоского фронта распространения, между волновыми векторами двух фотонов был угол (рис. 1), бифотонному состоянию приписывалась масса, как формальная константа, из закона сохранения энергии $m^2c^4 = E^2 - p^2c^2$, энергия двух фотонов $E = 2\hbar\omega$, импульс p = $2\hbar k = 2\hbar\omega cos(\frac{\theta}{2})$/c, а значит $m = 2\hbar\omega\sin(\frac{\theta}{2})/c^2$. Тогда скорость распространения v = c^2p/E будет $c\sqrt{1 - m^2c^4/E^2}$. Развивая дальше данную мысль, поскольку скорость света не меняется, а меняется метрика, и раз показатель преломления $n = \sqrt{g_{00}}$ = c/v, тогда, поскольку и масса фотона равна нулю, можно считать эту массу также искривлением, вследствие неплоского фронта распространения. То есть вместо массы можно приписать искривление, которое даёт угол между фотонами, как и наоборот, а вместо скорости, отличной от c, можно приписать показатель преломления, равный корню из метрического тензора. Тогда получим, что $\sqrt{g_{00}}$ = c/v = $1/\sqrt{1 - m^2c^4/E^2} = 1/cos(\frac{\theta}{2})$. Тогда при углах расходимости порядка 0,1 получим, что показатель преломления, порядка нескольких тысячных, как и разница показателей преломления в кварцевых световодах например.



Рис. 1. Угол между волновыми векторами

В области самофокусировки (в волноводной области с повышенным показателем преломления) появляется дополнительное искривление из-за нелинейности показателя преломления $n_2I = \Delta n = \sqrt{g_{00}} = \sqrt{2/(1 + cos\theta)}$, которое даёт дополнительный угол сходимости, компенсируя дифракционную расходимость. Таким образом область пучка, где мощность превышает пороговую мощность самофокусировки, образует волновод с повышенным показателем преломления $n_2I = \Delta n$, где траектории лучей стягиваются под углом полного внутреннего отражения, не выпуская изнутри фотоны, угол расходимости между которыми был меньшим, то есть фотоны в данной области, распространяющиеся под такими углами, испытывают коллапс.

Список литературы

1. Якушенков П.О. Диэлектрическая проницаемость с точки зрения общей теории относительности // VIII Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сбор. науч. тр. 2019.

2. Vintskevich S.V., et al. Lorentz-invariant mass and entanglement of biphoton states // Laser Phys. Lett. 2019. V. 16. P. 065203.

УДК 535(06)+004(06)

Д.А. ПОЛЕТАЕВ, Б.В. СОКОЛЕНКО
Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ТРЕНИЯ ГАЗА О СТЕНКИ ГАЗОПРОВОДОВ

В работе проводится численное моделирование воздействия оптического вихря на газ высокого давления. Выдвигается гипотеза о возможности применения данного взаимодействия для снижения трения газа о стенки магистральных газопроводов.

D.A. POLETAEV, B.V. SOKOLENKO
V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

THE FEATURES OF USING OPTICAL RADIATION FOR REDUCING GAS FRICTION IN PIPELINE

In this paper a theoretical model which estimates the impact force of optical radiation on gas. The description of the features of the application and the theoretical substantiation of the proposed method are given.

Газопроводы – весьма удобны и практичны для осуществления транспортировки данного топлива [1]. В отличие от цистерн и танкеров, трубопроводы экономичны и весьма эффективны. Однако на больших расстояниях транспортировки наблюдаются эффекты, связанные с трением газа о стенки труб. Это приводит к снижению скорости перекачки топлива [1]. Коэффициент трения зависит от многих факторов: турбулентности, шероховатости стенок, температуры, давления и так далее. Целесообразно предложить простой метод снижения трения при сохранении высокой скорости перекачки.

Оптические вихри в текущее время активно применяются для захвата и удержания частиц [2]. Многочисленные эксперименты показывают перспективность и практическую реализуемость данного подхода [2]. Целесообразно применить оптические вихри для снижения трения газа о стенки газопроводов.

Целью работы является теоретический расчёт силы воздействия оптического излучения на газ и предложение методов применения для магистральных газопроводов.

В работе [2] описывается несколько механизмов взаимодействия оптического излучения с молекулами, в результате чего делается вывод о наибольшем вкладе градиентной силы. Данный эффект проявляется при резком изменении напряжённости электромагнитного поля. Предложенное в работе [2] уравнение для оценки силы взаимодействия оптического излучения и молекул применено в разработанной модели. При этом учитывались характерные размеры молекул газа, типы газовых магистралей (низкого давления – до 0,005 мПа, среднего давления – до 0,3 мПа, высокого давления – до 0,6 мПа). На рис. 1 представлена зависимость силы, воздействующей на молекулу газа в зависимости от мощности лазерного излучения с длиной волны 1080 нм. Точкой на графике отмечена сила, достаточная для удержания газа от трения о стенку для диапазонов рабочих давлений от 0,005 до 0,6 мПа [1].

Из графика на рис. 1 видно, что мощность лазера, необходимая для удержания плазмы, равна приблизительно 10^{-5} Вт. Разумеется, применять требуется целый массив лазеров с формирователями вихрей по периметру стенок трубопроводов. Кроме того, целесообразно отметить необходимость прямолинейного распространения лазерного излучения. Так, повороты трубопроводов требуют сложную организацию системы зеркал или дополнительных массивов лазеров.

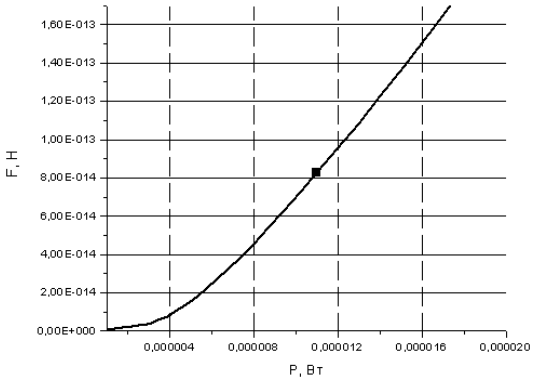


Рис. 1. Зависимость силы воздействия оптического вихря на газ от мощности лазера

Список литературы

1. Лурье М. // Территория нефтегаз. 2013. Т. 2. С. 80-85.
2. Faegheh H., et al. // Optical Express. 2010. V. 18 (2). P. 1-9.

УДК 535(06)+004(06)

Д.Г. ДЕНИСОВ
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

АНАЛИЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ КОГЕРЕНТНЫХ СВОЙСТВ И ЭЛЛИПСОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯННОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ШЕРОХОВАТЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Проанализированы результаты теоретических исследований, посвящённых изучению когерентных и поляризационных свойств источников оптического излучения. Рассмотрены понятия временной и пространственной когерентности квазимонохроматического источника излучения, а так же понятия площади и объёма квантово-механической ячейки в некоторой области пространства для определённого источника оптического излучения. Для анализируемого объёма когерентности рассмотрено среднее число фотонов в определённом спиновом состоянии, определяющее в квантовой статистике параметр вырождения лазерного излучения (электромагнитного поля).

D.G. DENISOV
Bauman Moscow State Technical University

ANALYSIS AND INVESTIGATION OF COHERENT PROPERTIES AND ELLIPSOMETRIC CHARACTERISTICS OF SCATTERED LASER RADIATION FROM ROUGH OPTICAL SURFACES

The results of theoretical studies devoted to the study of coherent and polarization properties of optical radiation sources are analyzed. The concepts of temporal and spatial coherence of a quasi-monochromatic radiation source, as well as the concepts of the area and volume of a quantum mechanical cell in a certain area of space for a certain optical radiation source are considered. For the analyzed coherence volume, the average number of photons in a certain spin state is considered, which determines the degeneracy parameter of laser radiation (electromagnetic field) in quantum statistics.

Как известно, все источники оптического излучения характеризуются не только определёнными пространственно-угловыми характеристиками, но спектральными и когерентными свойствами [1 - 4]. Так, например, при рассмотрении физических процессов интерференции важными являются проявления временной когерентности между двумя пучками, поскольку формируемый контраст интерферограмм зависит от времени задержки между этими пучками. В свою очередь произведение времени задержки на ширину полосы спектральной линии источника излучения должно быть

менее единицы, что определяет время и длину когерентности источника излучения. При суперпозиции как минимум двух пучков оптического излучения с учётом фазовых соотношений определяющим фактором является пространственная когерентность, характеризующая расстояние между двумя осциллирующими источниками (вторичными). Результат суперпозиции наблюдается в плоскости локализации интерференционных полос, удалённой от вторичных источников на определённом расстоянии. Площадь анализируемой плоскости локализации называют площадью когерентности оптического излучения, а квадратный корень из данной величины определяет поперечную длину когерентности. Допуская, что электромагнитное поле представляет собой квазимонохроматическую плоскую линейно-поляризованную волну, можно показать, что прямой цилиндр, основанием которого является площадь когерентности, высотой равной продольной когерентности, определяет объём когерентности некоторой квантово-механической ячейки в пространстве. В объёме этой ячейки содержание среднего числа фотонов в определённом спиновом состоянии задаёт параметр вырождения. На языке квантовой статистики параметр вырождения это среднее число фотонов, находящихся в одинаковом квантовом состоянии [3, 4]. Дальнейшие теоретические исследования дают основания полагать, что именно параметр вырождения является первичным в определении когерентных свойств оптического и, в частности, лазерного излучения с точки зрения количества фотонов в анализируемой квантово-механической ячейке с определёнными эллипсометрическими характеристиками. Важно отметить, что параметр вырождения определяющим образом будет влиять на пространственную когерентность лазерного излучения при его взаимодействии с объектом (предметом), имеющим неоднородный профиль поверхности, а значить определять условия формирования пространственной спекл-структуры для определённых эллипсометрических характеристик. Спекл-структура же, в свою очередь в значительной степени влияет как на распределение интенсивности среднего значения, так и на контраст регистрируемого видеоизображения в оптико-электронных приборах контроля параметров качества оптических изделий, а значит и на точностные характеристики контролируемого качества профилей оптических поверхностей.

Список литературы

1. Denisov D.G. // Applied physics. 2022. No. 1. P. 89-96.

2. Azarova V.V., Dmitriev V.G., et al. // Quantum Electronics. 2000. V. 30. No. 4. P. 360-364.

3. Ларкин А.И. Юу Ф.Т.С. Когерентная фотоника. М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2006.

4. Вольф Э., Мандель Л. Когерентные свойства оптических полей // Успехи физических наук. 1965. Т. 87. Вып. 3. С. 491-520.

УДК 535(06)+004(06)

Я.В. ТЕРЛО, А.О. ВОЗНЕСЕНСКАЯ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ОТОБРАЖЕНИЯ ЛУЧЕЙ ДЛЯ КОНСТРУИРОВАНИЯ СИСТЕМ НЕИЗОБРАЖАЮЩЕЙ И ИЗОБРАЖАЮЩЕЙ ОПТИКИ

В работе представлены результаты применения алгоритма, реализующий одновременный синтез одной или двух поверхностей свободной формы (ОПСФ) для монохроматических систем с нулевым угловым полем. Рассмотрена возможность расчёта систем без ОПСФ, построенных с помощью данного алгоритма и последующей аппроксимацией сферическими поверхностями.

Ya.V. TERLO, A.O. VOZNESENSKAYA
ITMO University, Saint-Petersburg

USING THE RAY MAPPING METHOD FOR THE CONSTRUCTION OF NON-IMAGING AND IMAGING OPTICAL SYSTEMS

The paper presents the results of using an algorithm that implements the simultaneous synthesis of one or two freeform surfaces (freeforms) for monochromatic systems with zero angular field. The possibility of calculating systems without freeforms constructed using the above algorithm and subsequent approximation by spherical surfaces is considered.

Использование оптических поверхностей свободной формы (ОПСФ) при конструировании оптического прибора позволяет манипулировать волновыми фронтами с большим уровнем контроля за счёт меньшего количества компонентов, сохраняя при этом высокое качество изображения [1]. Путь каждого луча определяется законом Снеллиуса, который следует непосредственно из принципа Ферма. Таким образом, использование ОПСФ позволяет обеспечить практически дифракционное качество в компактных размерах.

Среди методов синтеза ОПСФ стоит отметить метод геометрического отображения лучей (МГОЛ). Расчёт траекторий прохождения лучей через систему с ОПСФ в прямом и обратном ходе, создающих заданную диаграмму освещённости $P(x_p, y_p)$ для известного входного волнового фронта $S(x_s, y_s)$, позволяет быстро и автоматизировано найти опорные

точки ОПСФ оптической системы [2]. Общий принцип МГОЛ описывается следующим уравнением:

$$u : S \to S(x_s, y_s) \to P(x_p, y_p)$$
$$\mu = |du|\mu_1 \cdot u \qquad (1)$$

Целью работы является проверка действенности использования данного метода для расчёта монохроматических неизображающих и изображающих систем, содержащих асферические поверхности (так как все рассмотренные системы работают с осевым пучком) или только сферические поверхности, удовлетворяющие критериям минимальных аберраций. Также реализуется расчёт как одной, так и двух ОПСФ в ходе одного расчётного процесса.

Используемый алгоритм итерационен: для каждого луча из входного пучка (волнового фронта) рассчитывается ход луча в прямом и обратном ходе через оптическую систему. При прохождении через поверхность с ОПСФ ищется нормаль к поверхности, обеспечивающая меньшее отклонение выходного луча от требуемого, постепенно доводя точность определения опорной точки ОПСФ до установленного критерия (с точностью 10^{-10} рад для угла между оттрассированными лучами и с точностью 1 нм для их взаимного расположения [3]).

Полученные опорные точки аппроксимируются с помощью радиальных сплайнов (NURBS), посредством моделирования оптических элементов в CAD SolidWorks, после чего модели импортируются в Zemax. Результирующие системы обладают высокой точностью воспроизведения выходного волнового фронта (1 - 2 %) с минимальными аберрациями (0.7 - 0.8 мрад). Это позволяет утверждать, что МГОЛ применим как в неизображающей оптике, так и для некоторых систем изображающей оптики, вроде телескопических систем и зрительных труб.

Дальнейшие исследования планируется направить на развитие алгоритма для унификации расчётов оптических систем с несколькими длинами волн и ненулевым полем на минимум аберраций.

Список литературы

1. Nikolov D.K., Bauer A., Cheng F., Kato H., Vamivakas A.N., Rolland J.P. Metaform optics: Bridging nanophotonics and freeform optics // Science Advances. 2021, V. 7. No. 18.

2. Voznesenskaya A., Mazur I., Krizskiy P. Synthesis of freeform refractive surfaces forming various radiation patterns using interpolation // Proc. SPIE. 2017. V. 10379. P. 103790C.

3. Terlo Y.V., Voznesenskaya A.O. Modeling of a focal pi-Shaper using the ray-mapping method // J. Opt. Technol. 2023. V. 90. P. 242-248.

УДК 535(06)+004(06)

А.Ю. БУДНЕВ, О.Ф. ПРОСОВСКИЙ, А.Н. ИСАМОВ,
Ю.О. ПРОСОВСКИЙ, В.А. СМОЛЬЯНИНОВ
Обнинское научно-производственное предприятие «Технология» им. А.Г. Ромашина, Калужская обл.

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ПЯТНО ЛУЧА ПРИ УПРАВЛЕНИИ РАЗВЁРТКОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПУШКИ

В работе рассматриваются технологические особенности поведения луча на поверхности испаряемого материала в процессе нанесения интерференционных оптических покрытий методом электронно-лучевого испарения.

A.Yu. BUDNEV, O.F. PROSOVSKIY, A.N. ISAMOV,
Yu.O. PROSOVSKIY, V.A. SMOLYANINOV[1]
Obninsk Research and Production Enterprise Technologiya, Kaluga Region

FACTORS THAT AFFECT FOR SPOT WHEN CONTROLLING THE SWEEP OF ELECTRONIC BEAM GUN

The article shows technological features of the behavior of spot on the evaporating material during coating interference optical coatings by electronic beam evaporation.

В процессе нанесения покрытий электронно-лучевым методом (EBPVD) следует учитывать структурные и физические особенности при испарении каждого определенного материала. Воспроизводимость процессов напыления зависит не только от типа вещества или химического соединения, но и от его структурных особенностей, и даже фазового состояния вещества [1]. Характеристики материалов могут кардинально меняться при изменении условий, создаваемых в вакуумной камере: температура, интенсивность вакуумной откачки, парциальное давление, стехиометрическое соотношение реактивного и инертного газов, и т.п. Также играет роль размер, положение и перемещение пятна луча на поверхности испаряемого материала.

В процессе работы электронно-лучевой пушки поток электронов, разгоняясь, с высокой скоростью бомбардирует поверхность материала, располагающегося в тигле, расплавляет и испаряет его на подложку. Точка луча перемещается по поверхности материала при помощи электронно-управляемой развёртки [2].

При испарении различных веществ оптимально использование индивидуальных паттернов для каждого материала, представляющих из себя форму, получаемую при перемещении луча развёрткой (рис. 1), а также скорости перемещения точки. Эти характеристики оказывают значительное влияние на скорость распыления, равномерность прогрева материала и его поведение – многие материалы, такие как HfO_2 или ZrO_2, вследствие длительного и неравномерного нагрева могут менять форму и состояние, что делает невозможным воспроизведение длительного процесса производства многослойного светофильтра.

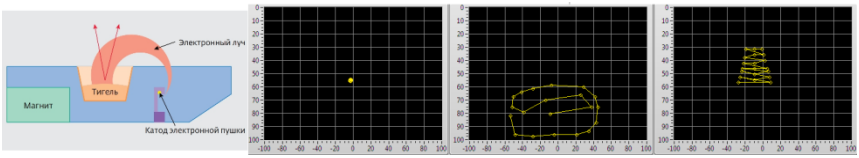


Рис. 1. Схема работы электронно-лучевой пушки и паттерны лучей для материалов: Al, HfO_2, Nb_2O_5

Для настроенного под материал паттерна существуют факторы, влияющие на перемещение и изменение формы пятна в ходе процесса. Самый заметный фактор – изменение высоковольтного ускоряющего напряжения (HV), электронно-лучевой пушки. Изменение HV даже на 10 - 15 % сильно перемещает луч по оси Y относительно катода. Менее заметно луч при этом смещается по оси X. Размеры луча также меняются – при увеличении HV луч удаляется от катода и растягивается. Также оказывает влияние значение вакуума в камере, например при изменении парциального давления. Данный фактор оказывает не настолько заметное влияние как изменение HV, однако перемещение луча может сыграть роль при напылении металлов. Например, при напылении Al перемещение луча диаметром ~ 3 мм составляет 8 - 10 мм (пушка 10 kV) при изменении давления с $7 \cdot 10^{-6}$ mbar до $2 \cdot 10^{-4}$ mbar.

Кратковременные перемещения луча относительно устоявшегося паттерна также возможны в случае нештатных ситуаций, таких как "пробои" по высокому напряжению на массу или микровзрывы при разогреве или испарении нестабильного материала.

Список литературы

1. Prosovskii Y.O., Denisov D.G. Structural changes in niobium oxide during electron beam evaporation // Proc. SPIE. 2021, V. 11783. P. 117830O.

2. Иванов А., Смирнов Б. Электронно-лучевое напыление: технология и оборудование // Наноиндустрия. 2012. № 6 (36). С. 28-34.

УДК 535(06)+004(06)

М.С. КУЗЬМИН, С.А. РОГОВ
Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

УВЕЛИЧЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА ОПТИЧЕСКОГО СПЕКТРОАНАЛИЗАТОРА ПРИ ДИСКРЕТНОМ ВВОДЕ СИГНАЛОВ

Предлагается метод устранения ложных сигналов нелинейности второго порядка в когерентном оптическом анализаторе спектра с пространственным интегрированием при дискретном вводе входных сигналов.

M.S. KUZMIN, S.A. ROGOV
The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications

INCREASING THE DYNAMIC RANGE OF AN OPTICAL SPECTRUM ANALYZER WHEN DISCRETE SIGNAL INPUT

A method is proposed for eliminating false signals of second-order nonlinearity in a coherent optical spectrum analyzer with spatial integration with discrete input of input signals.

В качестве устройств ввода оптических спектроанализаторов, работающих в реальном масштабе времени могут использоваться пространственные модуляторы света (ПМС) с электронным управлением, например, ЖК-матрицы, которые осуществляют ввод сигналов дискретно из-за конечного размера пикселов. Спектр дискретного сигнала, формируемый на выходе устройства, представляет собой множественные спектры непрерывного сигнала, смещённые вдоль оси пространственных частот с шагом $1/\Delta x$, где Δx – шаг дискретизации входного сигнала [1].

Динамический диапазон оптического спектроанализатора ограничивается, в основном, ложными сигналами, появляющимися в оптической системе после ПМС из-за нелинейности его модуляционной характеристики. Наиболее сильными, существенно снижающими динамический диапазон, являются ложные сигналы, связанные с квадратичным слагаемым в разложении модуляционной характеристики – это ложные сигналы на двойных частотах и на суммарных и разностных частотах гармоник входного сигнала [2]. Чтобы устранить эти ложные сигналы из рабочего диапазона частот анализатора спектра, ширину рабочего диапазона ограничивают величиной в одну октаву:

$$\Delta\xi = \xi\max - \xi\min \leq \xi\max/2. \quad (1)$$

При дискретном вводе сигналов в анализатор спектра и условии (1), множественные спектры шириной в одну октаву на выходе устройства выглядят как показано на рис. 1 (изображены только основной и два соседних спектра). Согласно теоремы выборки, соседние спектры не перекрываются, если максимальная частота в непрерывном сигнале $\xi\max$ удовлетворяют условию: $\xi\max \leq 1/2\Delta x$. Рабочий диапазон частот ограничивается при этом величиной: $\Delta\xi \leq 1/4\Delta x$. Однако при дискретном вводе сильные ложные сигналы на двойных и суммарных частотах спектра входного сигнала могут попасть в рабочую полосу (основной спектр) анализатора спектра из соседних спектров и условие (1), эффективное для устранения ложных сигналов при непрерывном вводе сигналов, в данном случае не срабатывает.

Чтобы исключить сильные ложные сигналы нелинейности второго порядка при дискретном вводе, можно снизить максимальную частоту рабочего диапазона системы до величины $\xi\max \leq 1/3\Delta x$, организовав защитный интервал между соседними спектрами, как показано на рис. 2. Учитывая, что условие (1) по-прежнему выполняется, получаем, что рабочая полоса устройства уменьшается при этом в полтора раза: $\Delta\xi \leq 1/6\Delta x$. Предложенный метод устранения сильных ложных сигналов при дискретном вводе сигналов был проверен нами экспериментально.

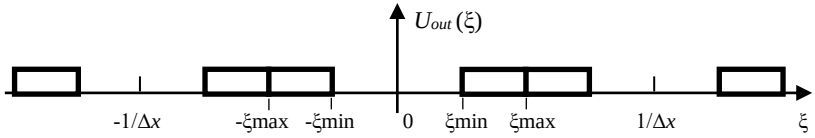


Рис. 1. Выходные спектры при дискретном вводе сигналов в анализатор спектра

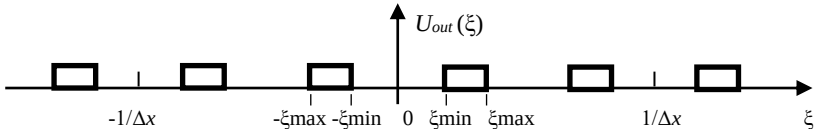


Рис. 2. Выходные спектры при введении защитного интервала между соседними спектрами в целях исключения ложных сигналов нелинейности второго порядка

Список литературы

1. Гудмен Дж. Введение в фурье-оптику. М.: Мир, 1970.
2. Дюбов А.С., Кузьмин М.С., Рогов С.А. // Оптич. журнал. 2023. Т. 90. Вып. 2. С. 78-88.

УДК 535(06)+004(06)

А.П. ЛАВРОВ, С.И. ИВАНОВ
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

АКУСТООПТОЭЛЕКТРОННЫЙ ПРОЦЕССОР ЛЧМ-РАДИОСИГНАЛОВ БОЛЬШОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ С СОГЛАСОВАННОЙ ФИЛЬТРАЦИЕЙ ПО СКОЛЬЗЯЩИМ СЕГМЕНТАМ СИГНАЛА

Проведено численное моделирование преобразований световой волны в акустооптоэлектронном процессоре ЛЧМ-радиосигналов большой длительности, когда акустооптическая (АО) часть процессора выполняет согласованную фильтрацию по скользящим сегментам сигнала, а оптоэлектронная часть – накопление парциальных результатов согласованной фильтрации, что выполняется в линейном многоэлементном фотоприёмнике, работающим в режиме временной задержки и накопления (TDI mode). Представлены результаты расчёта пространственно-временных распределений интенсивности света на выходе процессора при отношении сигнал-шум на входе много меньше единицы.

A.P. LAVROV, S.I. IVANOV
Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

ACOUSTO-OPTOELECTRONIC PROCESSOR OF LONG-DURATION CHRPS WITH MATCHED FILTERING OVER SLIDING SIGNAL SEGMENTS

Numerical modeling of light wave transformations in an acousto-optoelectronic processor for long-duration chirp radiosignals has been carried out. The acoustooptic part of the processor performs matched filtering on sliding signal segments, and the optoelectronic part accumulates partial results of matched filtering, which is performed in a linear CCD photodetector in TDI mode. The results of calculating the spatiotemporal distributions of light intensity at the processor output for a signal-to-noise ratio at the input much less than one are presented.

ЛЧМ-радиосигналы $s(t)$ с длительностью Ts и большой базой $B = \Delta f \cdot T$s при их обработке в согласованных фильтрах (СФ) обеспечивают работу систем при отношении сигнал/шум (С/Ш) на входе $<< 1$. ЛЧМ-радиосигналы $s(t) = \mathrm{Um}\ \cos(\omega t+\varphi)$, где $\omega = \omega_0+\beta t$, имеют квадратичное изменение фазы $\beta t^2/2$ при $|t| \le T$s$/2$. Известен эффект самофокусировки лазерного излучения при его дифракции на акустической волне, возбуждаемой ЛЧМ-радиосигналом в акустооптическом (АО) модуляторе [1], что эквивалентно работе СФ (рис. 1). Место самофокусировки (x_0,z_β) и

компрессия отклика – его полуширина $\Delta x_{0.5}$ (или $\Delta t_{0.5}$) определяются характеристиками ЛЧМ-сигнала в апертуре T_{AOM} АОМ [1]. В АО-процессоре связь пространства (x,D_{AOM}) и времени (t,T_{AOM}) – через скорость V_A акустической волны: $T_{AOM} = D_{AOM}/V_A$, $\Delta t_{0.5} \leftrightarrow \Delta x_{0.5}/V_A$.

Была исследована компрессия ЛЧМ-сигналов в случае, когда апертура $T_{AOM} << Ts$. Сигнал $s(t)$ «нарезается» на сегменты $s_P(t)$ длительностью T_{AOM}, и они последовательно заполняют апертуру АОМ, что приводит к перемещению отклика $I(x_{0P}(t),z_\beta)$ со скоростью V_{LFM}. В процессоре (рис. 1) фотоприёмник (CCD) – ПЗС-линейка в режиме временной задержки и накопления (TDI mode), это конвейерный режим его работы. Можно выбрать скорость конвейера $V_{CCD} = V_{LFM}$ (управление – частотой фаз F_{CCD}). Тогда ПЗС-линейка накапливает сигнал от всех сегментов, при этом обеспечивается инвариантность процессора к времени прихода ЛЧМ-сигнала [2]. Проведено численное исследование, с применением среды GLAD [3]. Здесь приведены результаты для следующих параметров: АОМ: $D_{AOM} = 1$ см, $V_A = 10^4$ м/с, $T_{AOM} = 1$ мкс, полоса частот $\Delta f_{AOM} = 1$ ГГц; ЛЧМ-сигнал: $\Delta f_S = 1$ ГГц, $Ts = N \cdot T_{AOM}$, $N = 11$; «нарезка» $s(t)$ на сегменты $s_P(t)$: а) «грубо» – сегменты примыкают друг к другу, их число $P = Ts/T_{AOM} = N$, б) сегменты $s_P(t)$ «скользят» в АОМ друг относительно друга (CCD – в конвейерном режиме, и он обеспечивает накопление парциальных результатов по всем таким сегментам), а число сегментов $P >> N$! На рис. 2 и 3 представлены результаты моделирования, при этом жёлтый цвет – результат компрессии («отклик» $I(x_{0P}(x))$ на один из сегментов $s_P(t)$, а фиолетовый цвет – результат усреднения в CCD по всем сегментам. Результаты приведены для отношения С/Ш = –25 дБ на входе АО-модулятора. Видно, что аддитивный шум эффективно усредняется.

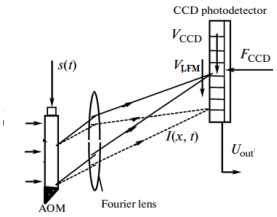


Рис. 1. Схема акустооптоэлектронного процессора

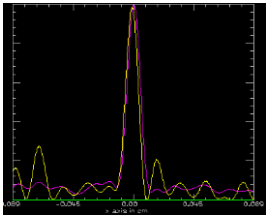


Рис. 2. Разделение ЛЧМ-сигнала на 11 сегментов

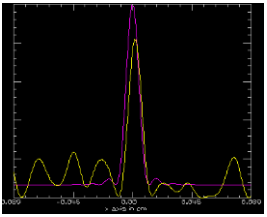


Рис. 3. Разделение ЛЧМ-сигнала на 2024 сегмента

Список литературы

1. Gerig J.S., Montague H. // Proc. IEEE. 1964. V. 52 (12). P. 1753.
2. Лавров А.П., Молодяков С.А. // Приборы и техника эксперимента. 2015. Т. 1. С. 136.
3. GLAD (General Laser Analysis and Design). https://aor.com/html/glad.html.

УДК 535(06)+004(06)

В.И. БУСУРИН, К.А. КОРОБКОВ, Л.Х. ЗО
Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ НЕЛИНЕЙНОСТИ УЗЛА СЧИТЫВАНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ БАЛОЧНОГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА МИКРООПТОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЛИНЕЙНОГО УСКОРЕНИЯ

В данной работе были исследованы конструктивные параметры балочного микрооптоэлектромеханического преобразователя линейного ускорения на основе оптического туннельного эффекта. Определены функция преобразования узла считывания перемещений балочного чувствительного элемента и максимальная амплитуда изменений рабочего зазора между балочным чувствительным элементом и считывающим узлом для обеспечения заданного диапазона измерения линейного ускорения. Проведён анализ погрешности нелинейности функции преобразования узла считывания при различных значениях чувствительности, длины волны и угла падения излучения.

V.I. BUSURIN, K.A. KOROBKOV, L.H. ZAW
Moscow Aviation Institute (National Research University)

ANALYSIS OF NONLINEARITY ERROR OF THE STATIC CHARACTERISTICS OF BEAM SENSING ELEMENT DISPLACEMENT READING NODE OF MICRO-OPTO-ELECTRO-MECHANICAL LINEAR ACCELERATION TRANSDUCER

The design parameters of a beam micro-opto-electromechanical linear acceleration transducer based on the optical tunneling effect are investigated. The conversion function of the reading node of beam sensing element displacement and the maximum amplitude of changes in the working gap between the beam sensing element and the reading node are determined to ensure a given measurement range of linear acceleration. The nonlinearity error of the conversion function of the reading node is analyzed for different values of sensitivity, wavelength and angle of incidence of radiation.

Рассматривается микрооптоэлектромеханический (МОЭМ) преобразователь линейного ускорения на основе оптического туннельного эффекта (ОТЭ) с балочным чувствительным элементом (ЧЭ). При

воздействии линейного ускорения на балочный ЧЭ, происходит субмикронное перемещение, изменяющее рабочий зазор до отражающей границы узла считывания. Узел считывания перемещений ЧЭ содержит источник излучения, призму полного внутреннего отражения, часть ЧЭ с нанесённым поглощающим покрытием, фотоприёмник [1].

Функция преобразования узла считывания перемещений балочного ЧЭ на основе ОТЭ определяется зависимостью выходной оптической мощности от рабочего зазора. Погрешность нелинейности функции преобразования узла считывания зависит от значения параметра m, называемого коэффициентом допустимого уменьшения чувствительности. Погрешность нелинейности функции преобразования узла считывания на основе ОТЭ определяется относительно аппроксимирующей функцию преобразования прямой, рассчитанной по методу наименьших квадратов. Увеличение значения параметра m приводит к увеличению диапазона перемещений ЧЭ $2\Delta d$ и к увеличению погрешности нелинейности функции преобразования $\delta_{нел}$. Увеличение длины волны приводит к увеличению диапазона перемещений ЧЭ и к увеличению погрешности нелинейности в заданном диапазоне изменения чувствительности. Например, при использовании длины волны $\lambda = 1{,}55$ мкм, угла падения $\theta = 45°$ и допустимом уменьшении чувствительности на 10 % для узла считывания МОЭМ-преобразователя линейного ускорения на основе ОТЭ обеспечивается погрешность нелинейности 0,6 %.

Алгоритм расчёта балочного МОЭМ-преобразователя на основе заданного диапазона линейных ускорений и погрешности нелинейности обеспечивает определение конструктивных параметров: начального зазора d_0, диапазона перемещений ЧЭ $2\Delta d$, длины L, толщины h, ширины ЧЭ w. Разработано программное обеспечение для реализации алгоритма расчёта МОЭМ-преобразователя линейного ускорения. Для измерения линейных ускорений в диапазоне ± 100 м/с^2 с заданной погрешностью определены значения параметров: $d_0 = 0{,}3393$ мкм, $L = 7{,}1$ мм, $h = 0{,}125$ мм, $w = 4{,}0$ мм.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-29-00954, https://rscf.ru/project/23-29-00954/.

Список литературы

1. Бусурин В.И., Коробков К.А., Шлеенкин Л.А. Метод «грубо-точного» считывания для преобразователя ускорения с адаптируемым оптическим модулем // Датчики и Системы. 2020. № 8. С. 27-34.

УДК 535(06)+004(06)

А.М. ЦАРЕВА, Н.И. ШАКИРОВ, А.А. ИВАНОВА,
О.В. ЭРГАШЕВА, Р.Х. МАКАЕВА
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ КРУГЛЫХ ПЛАСТИН ПРИ АНАЛИЗЕ РЕЗОНАНСНЫХ КОЛЕБАНИЙ РАБОЧИХ КОЛЁС ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

В работе представлены практические применения информации, полученной при голографических испытаниях круглых пластин, для решения практических задач колебаний рабочих колёс изделий машиностроения

A.M. TSAREVA, N.I. SHAKIROV, A.A. IVANOVA,
O.V. ERGASHEVA, R.Kh. MAKAEVA
The Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI

APPLICATION OF THE RESULTS OF ROUND PLATES' HOLOGRAPHIC TESTS IN THE RESONANT OSCILLATIONS ANALYSIS OF ENGINEERING PRODUCTS' IMPELLERS

This paper presents practical applications of information obtained via holographic study of round plates for solving practical problems caused by vibration of engineering products' impellers

Известно, что в процессе эксплуатации рабочие колёса изделий машиностроения претерпевают вибрационные нагрузки. При нежелательных резонансных явлениях возможны даже их разрушения, следовательно, утрата работоспособности изделия. Поэтому необходимо знание вибрационных характеристик тестируемых деталей [1].

Прототипом рабочих колёс могут служить закреплённые в центре круглые пластины. Предварительно были проведены экспериментальные голографические исследования таких пластин. Получены закономерности их колебаний: определена последовательность появления резонансных форм (рис. 1), рассчитаны частотные коэффициенты [2]. Полученная информация позволила решить ряд задач. Например, по нарушению колебаний диска колеса центробежного компрессора по классической форме пяти узловых диаметров (рис. 1, порядковый номер формы 5) было

определено место дефекта – непропая покрывного диска [3]. В работе [4] приведены результаты исследования причины эксплуатационного разрушения детали авиационного двигателя (рис. 2) благодаря полученной ранее информации о картинах форм колебаний круглых пластин. Форма колебаний по трем узловым диаметрам (рис. 1, порядковый номер формы 4) подтвердила предположение о зарождении трещины в местах пучностей колебаний, что явилось причиной разрушения детали.

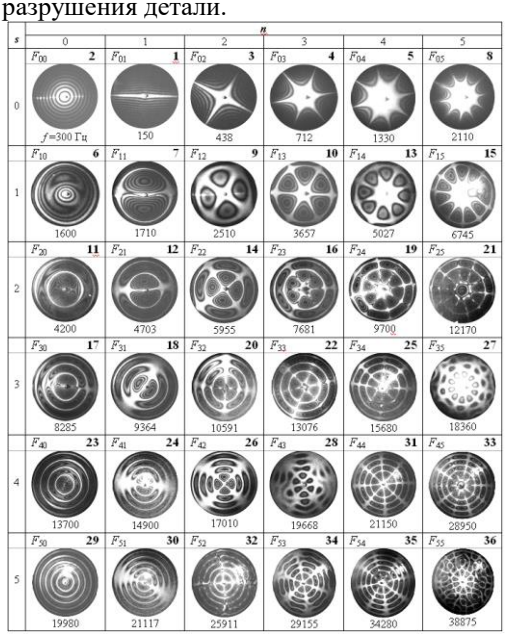


Рис. 1. Собственные частоты и резонансные формы колебаний диска постоянной толщины, полученные экспериментальным методом голографической интерферометрии



а *б*

Рис. 2. Крыльчатки авиационного двигателя: целая (*а*), разрушенная (*б*)

Таким образом, выявленные закономерности колебаний пластин – прототипов рабочих колёс позволяют решать ряд практических задач.

Список литературы

1. Иванов В.П. Колебания рабочих колес турбомашин. М. :Машиностроение, 1983.

2. Макаева Р.Х., Каримов А.Х., Царева А.М. Диагностика деталей и узлов турбомашин по их вибрационным характеристикам с применением голографической интерферометрии. Монография. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. 2011.

3. Царева А.М., Шакиров Н.И., Чемекова А.А., Благова Е.В., Макаева Р.Х. // XII Международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2023. С. 548-549.

4. Царева А.М., Макаева Р.Х., Сафина Д.М., Галимова Р.К. // Известия вузов. Авиационная техника. 2020. № . С. 172-175.

УДК 535(06)+004(06)

Г.Р. САГАТЕЛЯН, Е.Р. ПИСКУНОВА, А.С. КУЗНЕЦОВ,
А.Б. СОЛОМАШЕНКО
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕЦИЗИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДАМИ АБРАЗИВНОЙ ДОВОДКИ

Разработан этап технологического процесса изготовления прецизионных оптических деталей в форме тонких полированных с обеих сторон плоскопараллельных пластин различной конфигурации размером до 100 мм. Суммарные отклонения от плоскостности и взаимной параллельности сторон не превышают 2 - 3 мкм. Техническое решение применяется для изготовления цветовых калибровочных мер, имеющих габаритные размеры предметного стекла оптического микроскопа, а также оптического волновода, работающего на основе полного внутреннего отражения набором дифракционных решёток.

G.R. SAGATELIAN, E.R. PISKUNOVA, A.S. KUZNETSOV,
A.B. SOLOMASHENKO
Bauman Moscow State Technical University

TECHNOLOGICAL SUPPORT OF GEOMETRIC CHARACTERISTICS OF PRECISION OPTICAL PARTS BY ABRASIVE FINISHING METHODS

A stage of the technological process of manufacturing precision optical parts, in the form of thin plane-parallel plates polished on both sides of various configurations up to 100 mm in size, has been developed. The total deviations from the flatness and mutual parallelism of the sides do not exceed 2 - 3 microns The technical solution is used for the manufacture of color calibration measures having the overall dimensions of an optical microscope slide, as well as an optical waveguide operating on the basis of full internal reflection by a set of diffraction gratings.

Предлагается технология, основанная на симметричной одновременной обработке обеих поверхностей, что позволяет исключить коробление заготовок, а также образование клиновидности деталей вследствие отсутствия необходимости их наклеивания. Технологический процесс предусматривает формирование требуемых точностных характеристик деталей за две операции доводки и полирования.

Операцию доводки выполняют на настольном доводочном станке эксцентрикового типа. Обработка производится одновременно верхним и нижним притирами. Прямоугольные заготовки размещают в сепараторах. Обеспечивается возможность групповой обработки деталей размерами до 100 мм. Станок применяется также для обработки деталей дифракционной оптики. Заготовки таких ДОЭ для шлифовки и полирования имеют круглую форму, а требуемый контур обеспечивается лазерным вырезанием. Недостатком данной операции является то, что обработанные поверхности при любых режимах имеют погрешность формы в виде двухсторонней выпуклости. Поддержанием плоскостности рабочих поверхностей притиров добиваются минимальности этих отклонений – не более 2 - 3 мкм на 100 мм длины.

Для окончательной механической обработки деталей рассматриваемого класса создан станок двухстороннего полирования (рис. 1).

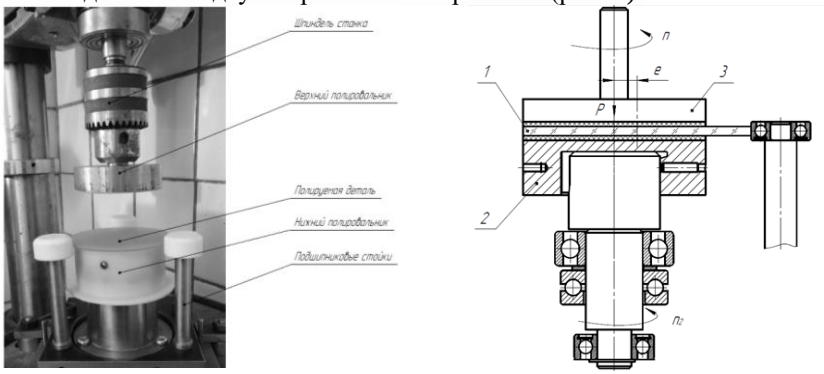


Рис. 1. Станок для двухстороннего полирования тонких оптических плоскопараллельных пластин

Особенностью его конструкции является то, что наряду с достижением требуемой оптической чистоты обрабатываемых поверхностей, обеспечивается и компенсация имеющихся на заготовке после операции шлифовки погрешностей формы, поскольку кинематика станка приводим к преимущественному съёму материала в центре заготовки [3, 4].

Список литературы

1. Махов Д.С., Сагателян Г.Р., Самородов А.В. // Измерит. техника. 2021. № 10. С. 60- 63.

2. Сагателян Г.Р., Самородов А.В., Кондратенко В.С., Пискунова Е.Р., Кузнецов А.С. // XII Межд. конф. по фотонике и информационной оптике: сб. науч. тр. 2022. С. 66-67.

3. Сагателян Г.Р., Пискунова Е.Р., Дубовик Н.Н., Кузнецов А.С. // Нанотехнологии: разработка, применение – XXI век. 2022. № 3. С. 47-55.

4. Сагателян Г.Р., Пискунова Е.Р., Кузнецов А.С. // Межд. конф. по голографии и прикладным оптическим технологиям: сб. науч. тр. 2022. С. 435-440.

УДК 535(06)+004(06)

Д.В. ПАВЛЕНКО, Е.К. ПЕТРОВА, Р.С. СТАРИКОВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

УПРАВЛЕНИЕ ФОРМОЙ КОРРЕЛЯЦИОННОГО МАКСИМУМА ДЛЯ ФИЛЬТРОВ С МИНИМАЛЬНОЙ СРЕДНЕЙ ЭНЕРГИЕЙ КОРРЕЛЯЦИИ

Приведены результаты исследования по управлению формой результирующих корреляционных функций фильтров с минимальной средней энергией корреляции.

D.V. PAVLENKO, E.K. PETROVA, R.S. STARIKOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

CORRELATION PEAK SHAPE CONTROL FOR MACE FILTERS

The results of a research on controlling the shape of the resulting correlation peaks of filters with a minimum average correlation energy are presented.

Одним из перспективных в развитии подходов к решению задачи оперативного распознавания образов и идентификации целей является корреляционный метод [1]. Суть корреляционного метода заключается в вычислении двумерной взаимнокорреляционной функции между изображениями входного и эталонного классов и в последующем анализе максимумов полученных корреляционных функций с целью классификации. Применение инвариантных фильтров в качестве эталонов при корреляционном распознавании позволяет обеспечить сохранение максимума корреляционной функции в условиях искажения изображений объектов, относящихся к истинному классу, таких как поворот, зашумление, изменение условий освещённости и другие. Первые работы по реализации инвариантного корреляционного распознавания появились в начале восьмидесятых годов прошлого столетия [1, 2], на настоящее время такая техника весьма развита. Одним из наиболее перспективных типов инвариантных фильтров стали составные корреляционные фильтры, синтезированные на основе тренировочного набора изображений объектов одного или нескольких классов.

Целью настоящей работы является исследование возможностей управления формой корреляционных максимумов фильтров с минимальной средней энергией корреляции. Минимизация средней

энергии корреляционного поля, выбранная в качестве метода оптимизации при синтезе составного фильтра, обеспечивает получение узкого и высокого корреляционного максимума для истинного изображения, что приводит к возможности точной локализации [1, 3, 4]. Использование сглаживающих функций при синтезе корреляционных фильтров является методом управления формой результирующего корреляционного поля, позволяющем повысить гибкость распознавания [4]. В данной работе предполагается, что преднамеренно усложнённый и заведомо известный вид корреляционного пика в совокупности с соответствующей ему метрикой призваны повысить селективность фильтра [5]. Было проведено моделирование, включавшее синтез фильтров с применением сглаживающих функций и расчёт корреляции распознаваемых изображений с ними. На рис. 1 представлен вид корреляционного поля синтезированного фильтра и изображения из истинного класса. На рис. 2 представлен вид корреляционного поля для изображения из ложного класса. Максимум корреляционной функции во втором случае ниже и теряет форму, что, по нашему мнению, может быть использовано для улучшения характеристик распознавания.



а *б*

Рис. 1. Вид корреляционного поля:
для изображения из истинного класса (*а*), для изображения из ложного класса (*б*)

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 23-12-00336.

Список литературы

1. Vijaya Kumar B.V.K., Mahalanobis A., Juday R. Correlation Pattern Recognition. 2002.

2. Hester C., Casasent D. Multivariant technique for multiclass pattern recognition // Applied Optics. 1980. V. 19. No. 11. P. 1758-1761.

3. Mahalanobis A., Vijaya Kumar B.V.K., Casasent D. Minimum average correlation energy filters // Applied Optics. 1987. V. 26. No. 17. P. 3633-3640.

4. Casasent D., Ravichandran G. Advanced distortion-invariant minimum average correlation energy (mace) filters // Applied Optics. 1992. V. 31. No. 8. P. 1109-1116.

5. Evtikhiev N., Shaulskiy D., Zlokazov E., Starikov R. Variants of minimum correlation energy filters: comparative study // Proc. SPIE. 2012. V. 8398. P. 83980G..

УДК 535(06)+004(06)

С.С. БАТАШОВА[1], А.А. ЗОЛОТУХИНА[2,3], А.В. ГУРЫЛЕВА[1,2], А.С. МАЧИХИН[2,3]

[1]Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
[2]Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва
[3]Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

КОРРЕЛЯЦИЯ СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКИХ, ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ И ФЛУОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ СОДЕРЖАНИЯ ХЛОРОФИЛЛА В ЛИСТЬЯХ РАСТЕНИЙ

Рассмотрена задача определения содержания хлорофилла в листьях растений различными методами. Приведены результаты корреляционного анализа гиперспектральных и флуориметрических данных листьев и содержания хлорофилла в них. Определены параметры, демонстрирующие наиболее тесную связь с концентрацией пигмента.

S.S. BATASHOVA[1], A.A. ZOLOTUKHINA[2,3], A.V. GURYLEVA[2], A.S. MACHIKHIN[2,3]

[1]Bauman Moscow State Technical University
[2]Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation" of the RAS, Moscow
[3]National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

CORRELATION OF SPECTROPHOTOMETRIC, HYPERSPECTRAL AND FLUORIMETRIC MEASUREMENTS OF CHLOROPHYLL CONTENT IN PLANT LEAVES

The problem of chlorophyll content estimation in plant leaves by various methods is considered. The results of the correlation analysis of hyperspectral and fluorimetric data of leaf samples and their chlorophyll content are presented. Parameters demonstrating the strongest correlation with pigment concentration in the samples have been identified.

Концентрация хлорофилла является важным показателем здоровья растений, играя ключевую роль в фотосинтезе. На сегодняшний день наиболее распространёнными для количественной оценки содержания хлорофилла являются лабораторные методы, основанные на разрушении структуры образца. Неинвазивность и возможность измерения концентрации пигмента в полевых условиях могут обеспечить компактные приборы на основе методов флуориметрии и спектроскопии отражения. Известно, что как отношение компонент спектра

флуоресценции [1], так и вегетационные индексы [2], определяемые по спектру отражения, значительно коррелируют с содержанием хлорофилла в листьях растений.

Целью работы является определение коэффициента корреляции между концентрацией хлорофилла в листьях, флуориметрическими параметрами и вегетационными индексами. Эталонные значения содержания хлорофилла 15 образцов гибискуса (*Hibiscus rosa-sinensis*) определены с помощью спектрофотометрии. Спектры флуоресценции исследуемых образцов регистрировались в диапазоне λ = 660 - 760 нм с помощью лабораторного флуориметра с возбуждающим излучением λ = 455 нм. Коэффициент корреляции различных отношений компонент спектра флуоресценции и концентрации хлорофилла показаны на рис. 1. Сбор гиперспектральных данных проводился с помощью акустооптического видеоспектрометра. По спектрам отражения образцов были определены значения 15 индексов, чувствительных к содержанию хлорофилла.

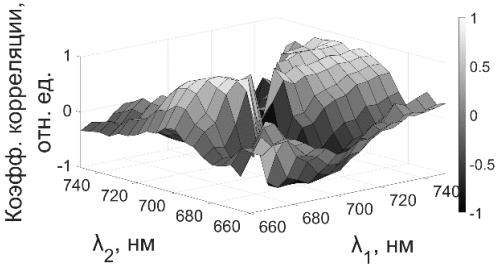


Рис. 1. Значения коэффициента корреляции между отношением компонент спектра флуоресценции на длинах волн λ_1 и λ_2 и концентрацией хлорофилла

На основе флуориметрических измерений наибольший коэффициент корреляции (0,97) был получен на длинах волн λ_1 = 685 нм и λ_2 = 690 нм. На основе гиперспектральных данных наибольший коэффициент корреляции составляет 0,94 для индекса CI_{RE}. Найденные связи позволяют выдвинуть требования к компактному прибору, определяющему содержание хлорофилла в полевых условиях.

Список литературы

1. Калмацкая О.А. Флуоресцентные показатели листьев растений: влияние условий освещения и обработки физиологически активными веществами.: дисс. канд. физ.-мат. наук. Москва: МГУ, 2017.

2. Wu C., Niu Z., Tang Q., Huang W. Estimating chlorophyll content from hyperspectral vegetation indices: Modeling and validation // Agricultural and Forest Meteorology. 2008. V. 148. No. 8-9. P. 1230-1241.

УДК 535(06)+004(06)

Н.А. ЕГОРЧЕНКОВ, И.Н. ПАВЛОВ, И.Л. РАСКОВСКАЯ
Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

ПОСТРОЕНИЕ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДИФФУЗИОННОГО СЛОЯ В ПРОЗРАЧНЫХ ЖИДКОСТЯХ

Работа посвящена применению метода лазерной рефрактографии для диагностики диффузионного слоя, возникающего между двумя прозрачными перемешивающимися жидкостями. Приведены результаты сравнения рефрактограмм, полученных с помощью моделирования в Zemax по разработанной физической модели, и рефрактограмм, полученных на экспериментальной установке. Выявленное в результате разработки физической модели распределение показателя преломления в диффузионном слое обеспечивает минимальное значение среднеквадратичного отклонения экспериментальных данных от теоретических вне зависимости от вида диффундирующих молекул.

N.A. EGORCHENKOV, I.N. PAVLOV, I.L. RASKOVSKAYA
National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

CONSTRUCTION OF A PHYSICAL MODEL OF DIFFUSION LAYER IN TRANSPARENT LIQUIDS

The paper is devoted to the application of the laser refractography method for diagnostics of the diffusion layer arising between two transparent stirring liquids. The results of comparison of refractograms obtained by modeling in Zemax according to the developed physical model and refractograms obtained at the experimental setup are presented. The distribution of the refractive index in the diffusion layer revealed as a result of the physical model development provides the minimum value of the mean square deviation of the experimental data from the theoretical data regardless of the type of diffusing molecules.

Для экспериментального исследования квазиустойчивого распределения плотности в жидкости с солевой стратификацией пикноклинного типа применён оригинальный метод невозмущающей дистанционной диагностики – лазерная рефрактография [1]. На рис. 1 представлена характерная схема наблюдения рефрактограммы. Метод полностью сформирован как самостоятельный инструмент исследования различных диффузионных слоёв: вода-соленый раствор [2], вода-глицерин [3].

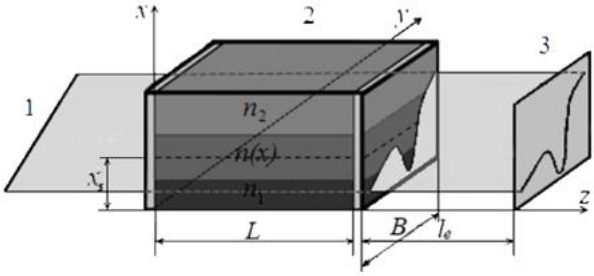


Рис. 1. Геометрия задачи: 1 – плоский лазерный пучок,
2 – оптически неоднородный слой, 3 – диффузный экран

Однако до сих пор не существует физической модели, которая была бы способна описать распределение показателя преломления в любом прозрачном слое с заданными параметрами. Ранее для каждого типа слоя подбиралась индивидуальная формула распределения показателя преломления [4].

Целью работы является разработка физической модели, описывающей разные типы диффузионных слоёв и выявление характеристической функции диффузионного слоя как оптической системы. Проверка работоспособности модели осуществлялась посредством сравнения рефрактограмм, полученных с помощью расчёта в программе Zemax с экспериментальными данными. Для моделирования в Zemax написана собственная программа, отвечающая за формирование необходимого градиента показателя преломления.

Получено решение задачи о распределении показателя преломления астигматического лазерного пучка (лазерной плоскости) в солестратифицированной жидкости.

Список литературы

1. Евтихиева О.А., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С. Лазерная рефрактография. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008.

2. Крикунов А.В., Ринкевичюс Б.С. Исследование рефракции плоского лазерного пучка в переходном слое стратифицированной жидкости // Вестник МЭИ. 2011. № 4. С. 97-101.

3. Суровцев П.Ю., Ринкевичюс Б.С. Восстановление профиля показателя преломления в диффузионном слое жидкости // XX МНТКСиА Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Тезисы докладов. Москва, 2014. Т. I.

4. Расковская И.Л., Сергеев Д.А., Ширинская Е.С. Диагностика характеристик солестратифицированной жидкости методом лазерной рефрактографии // Измерительная техника. 2010. № 10. С. 36-38.

УДК 535(06)+004(06)

В.О. ЧЕРЕШНЕВ, С.Г. ПРОСКУРИН
Тамбовский государственный технический университет

ФОРМИРОВАНИЕ ОКТ-ИЗОБРАЖЕНИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВКЛАДА ФОТОНОВ С РАЗЛИЧНЫМИ КРАТНОСТЯМИ РАССЕЯНИЯ

Приведены результаты исследования кровеносных сосудов человека *in vivo* при помощи оптического когерентного томографа, в ходе которого были получены матрицы дисперсий, отражающие количество актов рассеяния в ткани.

V.O. CHERESHNEV, S.V. FROLOV, S.G. PROSKURIN
Tambov State Technical University

OCT IMAGES RECONSTRUCTION DEPENDING ON CONTRIBUTION OF PHOTONS WITH SCATTERING MULTIPLICITY OF DIFFERENT ORDERS

The results of a study of human blood vessels *in vivo* using an optical coherence tomograph are presented, during which dispersion matrices were obtained that reflect the number of scattering events in the tissue.

Оптическая когерентная томография (ОКТ) стала популярным методом диагностики в различных медицинских областях, дающая возможность неинвазивной визуализации биообъектов с высоким разрешением. Понимание основополагающих принципов формирования ОКТ-изображений имеет решающее значение для улучшения его эффективности и извлечения дополнительной информации [1].

Исследование включало получение матрицы дисперсий путём анализа интерференционных картин обратнорассеянного света структурных ОКТ-изображений кровеносного сосуда человека (слева на рис. 1). Полученные матрицы дисперсий (справа на рис. 1), количественно отражают влияние различных коэффициентов рассеяния на формирование ОКТ-изображений. Эти матрицы позволили идентифицировать специфические вклады рассеяния от различных типов тканей, таких как слои кожи, кровеносные сосуды и области свободно пространства.

Матрица дисперсий обеспечивает количественную характеристику изменчивости флуктуаций фотонов в зависимости от типа ткани и глубины когерентного зондирования (ГКЗ) детектируемого фотона. Ткани

с более высоким коэффициентом рассеяния демонстрируют больше спекл-флуктуаций из-за большего количества событий рассеяния в ткани, что прямо отражается на интенсивности матрицы дисперсий [2, 3]. Результаты исследования подтвердили тканеспецифичную зависимость кратности рассеяния при формировании ОКТ-изображений.

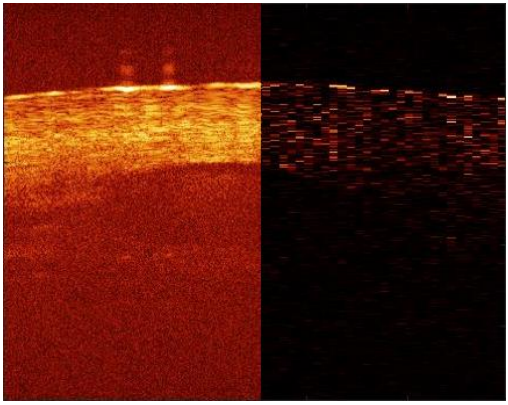


Рис. 1. Структурное ОКТ-изображение кровеносного сосуда человека *in vivo* (слева), матрица дисперсий структурного ОКТ-изображения (справа)

Примечательным наблюдением было уменьшение кратности рассеяния с увеличением глубины когерентного зондирования. По мере того как фотоны проникали глубже в ткани, интенсивность матрицы дисперсий заметно снижались. Это явление имеет последствия для глубины и разрешения изображений, подчеркивая необходимость тщательного рассмотрения свойств рассеяния при интерпретации изображений ОКТ на различной глубине.

Список литературы

1. Черешнев В.О., Романенко И.М., Кулешов И.В., Проскурин С.Г. Дифференциация структур кожи, кровеносных сосудов и крови посредством построения вариационной матрицы ОКТ-изображения // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 10-2. С. 319-323.

2. Проскурин С.Г., Фролов С.В., Визуализация кровеносных сосудов при помощи оптической когерентной томографии // Медицинская техника. 2012. № 3. С. 9-14.

3. Проскурин С.Г. Растровое сканирование и усреднение для уменьшения влияния спеклов в оптической когерентной томографии // Квантовая электроника. 2012. № 6. С. 495-499.

УДК 535(06)+004(06)

В.Г. ВОЛКОВ, П.Д. ГИНДИН, В.В. КАРПОВ, С.А. КУЗНЕЦОВ
Акционерное общество «Московский завод «Сапфир», Москва

МНОГОКАНАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС НАБЛЮДЕНИЯ

Рассматривается дневно-ночной всепогодный комплекс наблюдения, состоящий из ночного ТВ канала, дневного ТВ канала и тепловизионного канала.

V.G. VOLKOV, P.D. GINDIN, V.V. KARPOV, S.A. KUZNETSOV
Joint-Stock Company "Moscow Plant "Sapphire". Moscow

MULTI-CHANNEL SURVEILLANCE COMPLEX

A day-night all-weather surveillance complex consisting of a night TV channel, a daytime TV channel and a thermal imaging channel is considered.

В настоящее время широкое распространение получили приборы ночного видения [1]. Они работают ночью при хорошей погоде. Для всепогодной и круглосуточной работы предлагается многоканальный комплекс наблюдения, блок-схема которого представлена на рис. 1, а внешний вид – на рис. 2.

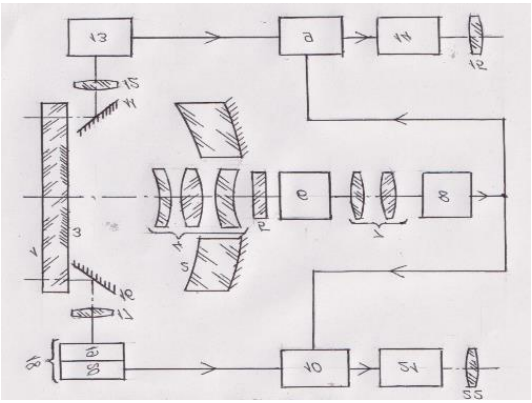


Рис. 1. Блок-схема комплекса



Рис. 2. Внешний вид комплекса

На рис. 1 показаны: *1* – защитное стекло, *2* – зеркало Манжена, *3* – кольцевое зеркало. *4* – трёхлинзовый компенсатор полевых аберраций, *5* – фильтр, *6* – электронно-оптический преобразователь (ЭОП), 7 – оптика переноса, *8* – первая ТВ-камера, *9* – четыре плоских зеркала. *10* – ТВ-объектив, *11* – вторая ТВ-камера, *12* – первый блок электронной обработки (БЭО), *13* – первый OLED-дисплей, *14* – левый окуляр, *15* – второе плоское зеркало, *16* – ИК-объектив, *17* – тепловизионный (ТВП) модуль, *18* – матрица микроболометров, *19* – электронный блок (ЭБ), *20* – второй БЭО, *21* – второй OLED-дисплей, *22* – правый окуляр. При работе ночью при хорошей погоде излучение звезд и Луны отражается от объекта наблюдения и фона, проходит сквозь защитное стекло *1*, отражается от зеркала Манжена *2*, кольцевого зеркала *3*, проходит через компенсатор *4*, фильтр *5* и создаёт изображение объекта и фона на фотокатоде ЭОП, который усиливает его по яркости. Изображение с экрана ЭОП через оптику переноса *7* передаётся на матрицу ПЗС первой ТВ-камеры *8*. Видеосигнал с её выхода подаётся на первые входы первого *9* и второго *10* БЭО. При работе днем при плохой погоде излучение от объекта и фона проходит через защитное стекло *1*, отражается от первого плоского зеркала *11*. ТВ-объектив *12* создаёт изображение объекта и фона на матрице ПЗС второй ТВ-камеры *12*. Видеосигнал с её выхода подаётся на второй вход первого БЭО *9*. В нем создаётся обработанный сигнал, поступающий в первый OLED-дисплей *14*. С его экрана оператор наблюдает изображение через левый окуляр *15*. При работе днем и ночью при плохой погоде собственное тепловое излучение от объекта и фона проходит через защитное стекло *1*, отражается от второго плоского зеркала *16*, а ИК-объектив *17* создаёт тепловое изображение объекта и фона на матрице микроболометров *19* ТВП-модуля *18*, создавая на её выходе выходной видеосигнал. Он усиливается и в ЭБ *20* и приходит на второй вход второго БЭО *10*, где обрабатывается и передаётся во второй OLED-дисплей *21*. С его экрана оператор наблюдает изображение через правый окуляр *22*. Таким образом, комплекс работает всепогодно и круглосуточно. Фотокатод ЭОП *6* работает в области спектра 0,4 - 0,9 мкм, ТВП-модуль *17* – 8 - 12 мкм. ТВ камеры *8* и *11* – 0,4 - 1,1 мкм. Экраны ЭОП 6, OLED дисплей *13* и *21* – 0,53 - 0,56 мкм.

Список литературы.

1. Волков В.Г., Гиндин П.Д. Достижения в технике видения. В 2-х книгах.. М.: Техносфера, 2019, Книга 1.

УДК 535(06)+004(06)

М.А. КОРОБКОВ, В.Д. ЗАЙКИН, А.С. ДЕМИДОВ,
О.В. ХОМУТСКАЯ
Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)

РАЗРАБОТКА ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ УСТАНОВКИ ПРЯМОГО ЭКСПОНИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ МАТРИЦЫ

Создан прототип установки прямого экспонирования печатных плат, использующий жидкокристаллическую матрицу в качестве фотошаблона. Рассмотрена проблема неравномерности полимеризации фоторезиста при проведении операции и предложен метод компенсации, заключающийся в наложении на изображение фотошаблона полупрозрачной маски. Проведены эксперименты по определению изменения цвета фоторезиста в зависимости от прозрачности фотошаблона, на основе которых определена функция необходимой прозрачности маски в зависимости расположения пикселя на матрице.

M.A. KOROBKOV, V.D. ZAJKIN, A.S. DEMIDOV,
O.V. KHOMUTSKAYA
Moscow Aviation Institute (National Research University)

DEVELOPMENT OF AN OPTICAL SYSTEM FOR DIRECT EXPOSURE INSTALLATION BASED ON A LIQUID CRYSTAL MATRIX

A prototype of a direct exposure unit for printed circuit boards using a liquid crystal matrix as a phototemplate is created. The problem of non-uniformity of photoresist polymerization during the operation is considered and a compensation method consisting in superimposing a semitransparent mask on the image of the photomask phototemplate is proposed. Experiments to determine the change of photoresist color depending on the transparency of the phototemplate were carried out, on the basis of which the function of the necessary transparency of the mask depending on the location of the pixel on the matrix was determined.

Среди выпускаемых в настоящее время установок экспонирования, применяемых при производстве печатных плат (ПП), отсутствуют позволяющие обеспечить высокое качество результата за доступную цену. В ходе проведённого исследования [1] описана технология прямого экспонирования, в котором в качестве фотошаблона выступает жидкокристаллическая (ЖК) матрица. Принцип технологии основан на

воздействии УФ-излучения на заготовку с нанесённым фоточувствительным материалом (фоторезистом) через монохромную ЖК-матрицу с изображением проводящего рисунка ПП. Применение ЖК-матрицы в качестве фотошаблона позволяет с одной стороны избавиться от недостатков применения плёночных фотошаблонов, что снизит стоимость, а с другой – повысит качество технологической операции при изготовлении ПП путём программного анализа местоположения отверстий на ПП и совмещения шаблона с заготовкой [2].

Однако, проведённые на лабораторном прототипе эксперименты показали неравномерную полимеризацию фоторезиста по поверхности заготовки, вызванное неравномерностью излучения УФ-источника.

Для компенсации неравномерности излучения предлагается применять полутоновую маску, наложенную на изображение фотошаблона. Для формирования маски проведены эксперименты с использованием шаблонов разной степени прозрачности и проанализировано изменение цветовых составляющих изображений фоторезиста от степени затемнения шаблона. Произведена оценка изменения значений минимальной, максимальной и средней яркости фоторезиста на изображениях. Методом наименьших квадратов получена функция компенсирующей маски, накладываемой на фотошаблон. Экспериментально подтверждено уменьшение неравномерности излучения ультрафиолета у прототипа – с применением компенсирующей маски среднеквадратическое отклонение зелёной составляющей гистограмм изображений уменьшилось на 51 % относительно изображений, полученных без неё (рис. 1 и 2).

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 23-29-10204.

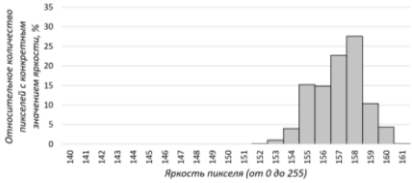


Рис. 1. Гистограмма распределения зелёной составляющей изображения фоторезиста с компенсирующей маской

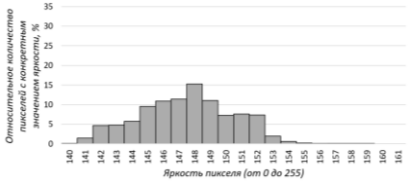


Рис. 2. Гистограмма распределения зелёной составляющей изображения фоторезиста без компенсирующей маски

Список литературы

1. Коробков М.А., Зайкин В.Д., Мареичев Е.С., Хомутская О.В., Васильев Ф.В. // Научное приборостроение. 2023. № 33 (1). С. 65-85.

2. Куликов Н., Хомутская О.В., Ванцов С.В. // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2018. № 2 (173). С. 186-191.

УДК 535(06)+004(06)

С.К. КРУГЛОВ, А.В. ЛУПИН
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ДИНАМИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ МАТРИЧНОЙ ВИДЕОКАМЕРЫ НА ОСНОВЕ «СИСТЕМЫ НА КРИСТАЛЛЕ»

Предложена модернизация режимов управления матричной видеокамеры, выполненной на ПЗС-фотоприёмнике. Реализация новых режимов управления выполнена на базе SoC («система на кристалле»).

S.K. KRUGLOV, A.V. LUPIN
Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

DYNAMIC CONTROL OF THE MODES OF OPERATION OF THE MATRIX VIDEO CAMERA BASED ON THE SoC

The modernization of the control modes of a matrix video camera made on a CCD photodetector is proposed. The implementation of the new control modes is based on SoC (system on a chip).

Для формирования изображения в видеокамерах и измерительных приборах широко используются ПЗС-фотоприёмники. Увеличиваются размеры изображения. С одной стороны, такие характеристики позволяют решать всё более сложные задачи, а с другой – избыточное хранение данных и большой объём вычислений. Если задача выполняется в реальном времени, то требуемая скорость сканирования должна быть согласована с временем обработки и сохранения данных.

Упрощение данной задачи является уменьшение объёма данных.

В работе [1] предложен режим работы ПЗС-фотоприёмника с новой его реализацией. Технический результат указанного метода в [1] заключается в увеличении частоты считывания матричных ПЗС-фотоприёмников с формированием сигналов двух изображений, различающихся полем зрения и разрешением: панорамного с большим полем зрения и малым разрешением и окна интереса с малым полем зрения и большим разрешением. Результат достигается тем, что перед считыванием зарядовых пакетов задают положение окна интереса, характеризуемое количеством строк N1, N2, задают уровень снижения разрешения в панораме, характеризуемый количеством суммируемых строк панорамы M, зарядовые пакеты считывают в три этапа и формируют сигналы двух

изображений. Первый и третий этапы считывания заключаются в выполнении соответственно N1 и N2 циклов строчного переноса, при этом считывание выходного регистра осуществляют лишь через каждые M циклов строчного переноса, во время второго этапа считывание выходного регистра осуществляют при каждом строчном переносе. Формируют два цифровых сигнала изображения: окна интереса и панорамы. Сигнал изображения окна интереса получают маскированием отсчётов сигнала, считанного во время второго этапа, а сигнал изображения панорамы получают последовательной композицией отсчётов сигнала, считанного в течение первого этапа, поэлементной суммой групп по M строк отсчётов сигнала, считанного в течение второго этапа и отсчётов сигнала, считанного в течение третьего этапа.

Реализация предложенного режима [2] была выполнена с использованием платы фирмы Analog Devices с процессором ADSP218x на языке ассемблер. Это было оправдано тем, что к тому времени был опыт и существенные наработки по применению данного процессора.

Для обеспечения продолжения исследований с новыми требованиями к объектам, появлению новых технологий и функциональных устройств, решено было применить платы с функцией «система на кристалле» (SoC) – отладочный модуль Xilinx Zynq-7000 SoC ZC702 [3]. Технология AMBA Advanced Extensible Interface позволяет достичь высоких скоростей передачи данных между двухъядерной вычислительной подсистемой на базе ARM CortexA9 MPCore и программируемой логикой в системах управления, передачи, ввода/вывода и памяти. Периферийные устройства процессорной системы разделяют до 54 внешних мультиплексируемых линий ввода-вывода.

Система (SoC) имеет программируемую логику и двухядерный процессор ARM Cortex-A9 MPCore™. Задача управления и обработки изображения была разделена на эти два устройства. Схема создана на языке SystemVerilog, программы для процессора – на языке Си.

Возможности экспериментальной установки по производительности увеличились в 20 - 30 раз, и позволили провести исследование характеристик видеокамеры в новых режимах.

Список литературы

1. Круглов С.К., Бронштейн И.Г., Иночкин Ф.М. Способ формирования сигнала изображения с помощью матричных приборов с зарядовой связью. Патент RU2539369. 2014.

2. Бронштейн И.Г., Васильев В.Б., Иночкин Ф.М. Круглов С.К. Сжатие экспериментальных видеоданных в оптико-электронных измерительных системах // Вопросы радиоэлектроники. Серия техника телевидения. 2015. № 6 (23). С. 44-48.

3. ZC702 Evaluation Board for the Zynq-7000 XC7Z020 SoC User Guide UG850 (v1.7) March 27, 2019.

УДК 535(06)+004(06)

В.Г. ВОЛКОВ, П.Д. ГИНДИН, В.В. КАРПОВ, С.А. КУЗНЕЦОВ
Акционерное общество «Московский завод «Сапфир», Москва

ТРЁХКАНАЛЬНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ОСВЕТИТЕЛЬ

Рассматривается трёхканальный импульсный лазерный осветитель, излучающий на длинах волн 0,53, 0,85 и 1,5 мкм в едином угле подсвета.

V.G. VOLKOV, P.D. GINDIN, V.V. KARPOV, S.A. KUZNETSOV
Joint-Stock Company "Moscow Plant "Sapphire". Moscow

THREE-CHANNEL PULSED LASER ILLUMINATOR

A three-channel pulsed laser illuminator emitting at wavelengths of 0.53, 0.85 and 1.55 microns in a single illumination angle is considered.

В настоящее время в технике ночного видения широкое распространение получили активно-импульсные приборы ночного видения с повышенной дальностью действия в условиях нормальной и пониженной прозрачности атмосферы, защищённые от световых помех, точно измеряющие дальность [1]. Одним из основных блоков приборов является импульсный лазерный осветитель (ИЛО). Но он излучает на длине волны только 0,85 мкм, в то время как для работы при пониженной прозрачности атмосферы нужна длина волны 1,55 мкм, для работы под водой – длина волны 0,53 мкм. В связи с этим предложен новый ИЛО, блок-схема которого дана на рис. 1, а его внешний вид – на рис. 2.

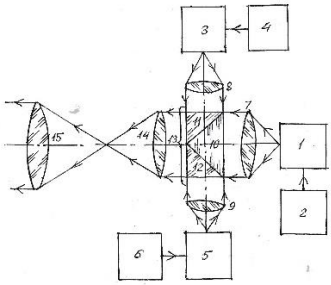


Рис. 1. Блок-схема ИЛО

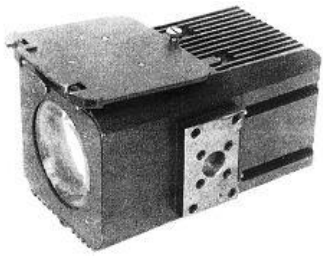


Рис. 2. Внешний вид

На рис. 1: *1* – импульсный лазерный полупроводниковый излучатель (ИЛП), *2* – первый блок накачки, *3* – второй ИЛПИ, *4* – второй блок накачки, *5* – третий ИЛПИ, *6* – третий блок накачки, *7*, *8*, *9* – соответственно первый, второй и третий проекционные объективы, *10*, *11*, *12* – соответственно первая, вторая и третья прямоугольные призмы, *13* – плоскопараллельная пластина, *14* – четвёртый проекционный объектив, *15* – объектив формирования излучения (ОФИ). Гипотенузные грани второй призмы *11* и третьей призмы *12* выполнены дихроичными. Первый блок накачки *2* создаёт импульсы тока накачки для первого ИЛПИ *1*. Он преобразует импульсы тока в импульсы излучения на длине волны 0,85 мкм. Они проходят через плоскопараллельную пластину *13*. Излучение приходит в четвёртый объектив *14*, который концентрирует его в своей первой фокальной плоскости, образуя тело свечения. Сфокусированный на него ОФИ *15* формирует требуемый угол подсвета. Одновременно второй блок накачки *4* создаёт импульсы тока накачки, для второго ИЛПИ *3*. Он преобразует импульсы тока в импульсы излучения на длине волны 1,55 мкм. Импульсы излучения отражаются от гипотенузной грани призмы *11* и приходят в четвёртый объектив *14*. Далее ИЛО работает, как и ранее. Одновременно третий блок накачки 6 создаёт импульсы тока накачки, для третьего ИЛПИ *5*. Он преобразует импульсы тока в импульсы излучения на длине волны 0,53 мкм. Импульсы излучения отражаются от гипотенузной грани призмы *12* и приходят в четвёртый объектив *14*. Далее ИЛО работает, как и ранее. Излучение всех трёх ИЛПИ суммируется в едином угле подсвета. Их можно включать попарно или в отдельности.

Список литературы.

1. Волков В.Г., Гиндин П.Д. Достижения в технике видения. В 2-х книгах.. М.: Техносфера, 2019, Книга 1.

УДК 535(06)+004(06)

Н.Н. БАЛАН[1,2], А.А. ВАСИН[1,2], В.В. ИВАНОВ[1],
А.Л. ПАНКРАТОВ[1]

[1]Научно-исследовательский институт молекулярной электроники, Зеленоград
[2]Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный

ПРАКТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОСТАВЛЯЮЩИХ ДОЗОВОЙ ОШИБКИ В ПРОЕКЦИОННОЙ ФОТОЛИТОГРАФИИ

В работе описываются средства и методики, необходимые для реализации способа практической оценки компонент дозовой ошибки литографического процесса.

N.N. BALAN[1,2], A.A. VASIN[1,2], V.V. IVANOV[1], A.L. PANKRATOV[1]

[1]Molecular Electronics Research Institute, Zelenograd
[2]Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

THE PRACTICAL ESTIMATION OF DOSE ERROR COMPONENTS IN PROJECTION PHOTOLITHOGRAPHY

In this work we describe the methods and tools for practical estimation of dose error components in projection photolithography.

В производстве интегральных схем выход годных практически напрямую зависит от совершенства инструментария проекционной фотолитографии [1], в том числе от качества используемых фотошаблонов [2].

Внесение изменений в литографический процесс (например, вынужденная замена материалов или каких-либо узлов установок экспонирования и обработки резиста) влечёт необходимость пересмотра требований, предъявляемых к используемым фотошаблонам (в силу возможного изменения значения дозовой ошибки, вносимой на том или ином этапе литографического процесса). В силу актуальности этой проблемы для отечественного полупроводникового производства в настоящее время, представляется целесообразным привлечение средств и методов, позволяющих в подобных ситуациях производить практическую оценку изменившихся составляющих дозовой ошибки, а также новых требований к литографическим инструментам, в частности, к качеству

рисунка на фотошаблоне, во избежание уменьшения выхода годных, обусловленного внесёнными в процесс изменениями.

По мнению авторов, для решения описанной задачи требуются:

- комплект специализированных аттестационных фотошаблонов, организованных по принципу «Picked-CD», предложенному компанией ASML для аттестации оборудования проекционной фотолитографии [3, 4], но содержащих топологические структуры, характерные для рассматриваемых литографических операций;
- средства моделирования литографического процесса;
- методы отсъёма и обработки результатов пропечатки аттестационных фотошаблонов, позволяющие выделить компоненты дозовой ошибки, соответствующие тому или иному её источнику (качество рисунка на фотошаблоне, неравномерность освещения, неоднородность обработки фоторезистивного стека и другие.).

Перечисленные средства в совокупности со встроенными в литографическую установку контрольно-измерительными устройствами позволят произвести оценку основных составляющих относительной дозовой ошибки литографического процесса а также оценить требуемые допуски на линейные размеры элементов рисунка на фотошаблоне.

Список литературы

1. Красников Г.Я., Горнев Е.С., Матюшкин И.В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 1. Уровни описания технологии // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника. 2017. № 1(165). P. 51-69.

2. Балан Н.Н., Жаворонкин Ю.Г. и др. Система требований к фотошаблонам для проекционной фотолитографии, применяемым в производстве полупроводниковых изделий современных проектных норм // Наноиндустрия. 2023. V. 16. № S9-1 (119). P. 122-131.

3. Waelpoel J.A.C., van Schoot J.B.P., Zanzal A.G. Demonstrating next-generation CD uniformity with today's tools and processes // Proc. SPIE. 1997. V. 3236. P. 275-283.

4. Kiers T., Mulder M., et al. Reticle error correction for lithography tool qualification benefits and limitations // Proc. SPIE. 2001. V. 4186. P. 217-226.

УДК 535(06)+004(06)

Е.Н. КОТЛИКОВ, Н.П. ЛАВРОВСКАЯ, Г.В, ТЕРЕЩЕНКО
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ ФИЛЬТР ДЛЯ ДАТЧИКОВ ОТКРЫТОГО ПЛАМЕНИ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ПАРАЗИТНЫХ ЗАСВЕТОК

Приведены результаты синтеза трёхполосного интерференционного фильтра, используемого для датчиков открытого пламени. Центральный пик пропускания является основным. Боковые пики пропускания используются как реперные для увеличения чувствительности датчика. Описанная структура предлагается к использованию на длине волны 4,4 мкм, которая определяет пик в излучении открытого пламени.

E.N. KOTLIKOV, N.P. LAVROVSKAYA, G.V. TERESHCHENKO
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

INTERFERENCE FILTER FOR OPEN FLAME SENSORS WITH COMPENSATION OF PARASITIC HIGHLIGHTS

There are the results of the synthesis of a three-band interference filter used for open flame sensors presented. The central transmission peak is the main one. Lateral transmission peaks are used as reference points to increase the sensitivity of the sensor. The described structure is proposed for use at a wavelength of 4.4 microns, which determines the peak in the radiation of an open flame.

Обнаружение очагов открытого пламени с выделением CO_2, H_2O, CO, сажы – основа систем противопожарной безопасности. Регистрация инфракрасного и/или ультрафиолетового излучения пламени реализуется в оптических системах [1 - 3].

В работе используются датчики на основе двух узкополосных интерференционных фильтров (УИФ). Первый, на длинах волн 4,0 и 5,0 мкм, компенсирует паразитные засветки. Второй, на 4,4 мкм, регистрирует излучение открытого пламени. Требуемые фильтры должны быть непрозрачными в остальных областях видимого и ИК-диапазона.

Для расчёта структур использовалась программа «FilmAnalysis» [4], позволяющая синтезировать различные спектры.

На рис. 1 приведён четырнадцатислойный УИФ при разных углах падения α. Конструкция фильтра (ПНВНВ2НВНВ). Плёнка с низким

показателем преломления Н – BaF_2, $n_Н = 1{,}40$, с высоким показателем преломления В – ZnSe, $n_В = 2{,}45$. Подложка – кремний, $n_П = 3{,}42$ [5].

На рис. 2 приведены спектры пропускания фильтра на 4 и 5 мкм. На одной стороне пластины из сапфира (П) нанесено зеркальное покрытие (П,В,Н,В,Н,В,Н,В,Н,В), отрезающее спектр ниже 4 мкм. На обратной стороне – покрытие, представляющее УИФ с максимумом пропускания 5 мкм (рис. 2, кривая 2). Его структура (П,В,Н,В,Н,2В,Н,В,Н,В). Здесь В – плёнка Ge, Н – плёнка BaF_2. В итоге получается фильтр, пропускающий на длинах волн 4 и 5 мкм (кривая 3), компенсирующий паразитное излучение.

Предложенное решение компенсации паразитных участков спектра позволит повысить чувствительность датчиков обнаружения пламени.

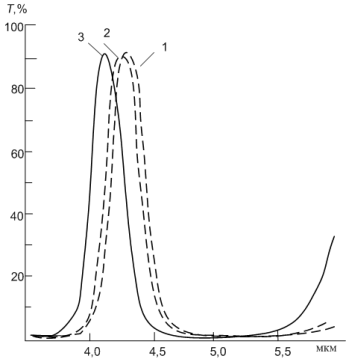


Рис. 1. Спектры пропускания двухсекционного фильтра: α = 0 ° (1), α = 15 ° (2), α = 30 ° (3)

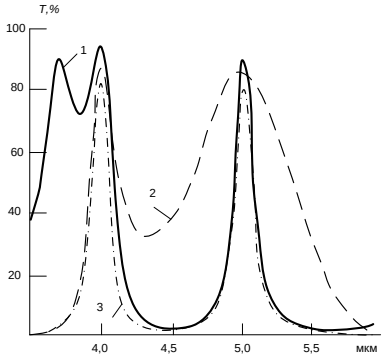


Рис. 2. Спектры пропускания: отрезающий фильтр (1), интерференционный фильтр (2), результирующий спектр (3)

Список литературы

1. Старшинов Б.П. Системы пожарной безопасности. Учебное пособие. 2003.

2. Варфоломеев С.П., Горбунов Н.И., Дийков Л.К., Медведев Ф.К. Датчики для систем обеспечения пожаро- и взрывобезопасности // Датчики и системы. 2004. № 6. С. 5-7.

3. Афанасьев Д.С., Бардакова Е.А., Быстряков Д.С. Аналитический обзор датчиков летучих веществ для интернета вещей. // Информационные технологии и телекоммуникации. 2016. Т. 4. С. 1-12.

4. Котликов Е.Н., Котликов А.Н., Юрковец Е.В. Программа анализа оптических спектров пленок «FilmAnalysis». Свидетельство о регистрации № 2018611718 от 05.02.2018.

5. Тропин А. Н. Пленкообразующие материалы для тонкослойных оптических покрытий: новые задачи и перспективы // Успехи прикладной физики. 2016. Т. 4. № 2. С. 206-211.

УДК 535(06)+004(06)

М.К. БРАЖНИКОВ, Н.П. ХАТЫРЕВ
Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Московская обл.

ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ И ПЛОТНОСТИ ГАЗОВ МЕТОДАМИ ОПТИЧЕСКИХ ЧАСТОТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

В работе представлен метод использования оптического резонатора Фабри–Перо для определения давления газа на основе измерения сдвига частоты лазера, привязанной к моде резонатора. Рассматривается необходимость дополнительных расчётов для случая неидеального газа. Приведены преимущества и технические трудности рассматриваемого оптического метода измерения давления.

M.K. BRAZHNIKOV, N.P. KHATYREV
Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering, Mendeleevo, Moscow region

GAS PRESSURE AND DENCITY MEASUREMENT BY OPTICAL FREQUENCY MEASUREMENTS

This work presents a method of using the Fabry–Perot optical resonator to determine the gas pressure based on the measurement of the shift of the laser frequency tied to the resonator mode. The necessity of additional calculations for the case of non-ideal gas is considered. The advantages and technical difficulties of the considered optical method of pressure measurement are presented.

Точность измерений давления и плотности газов обеспечивается применением первичных эталонов на основе поршневых манометров, обеспечивающих наиболее точные и стабильные измерения этих величин. Однако, измерения с помощью таких манометров сложны, требуют соблюдения жестких условий эксплуатации и наличия квалифицированного и опытного персонала. Но в современных условиях требуется повышенная точность измерений не только на уровне первичных эталонов на и в широкой измерительной практике. Преодолеть недостатки традиционных методов позволяет использование оптических методов измерения, основанных на уравнении Лоренца–Лоренца, описывающем связь между преломлением газов и их плотностью и на результатах точных квантовомеханических расчётов поляризуемости используемого модельного газа. Наиболее перспективным методом является определение давления газа на основе измерения сдвига частоты

лазерного излучения, привязанного к одной из резонансных частотных пиков резонатора Фабри–Перо (рис. 1). Такой метод можно считать первичным в некотором диапазоне измеряемых давлений. Для расширения области его применения необходимы расчёты вириальных коэффициентов при ограничении использования уравнения идеального газа. Несмотря на технические проблемы использование оптических методов частотных измерений вполне реализуемы с использованием компенсационных методов. Применение оптических частотных методов измерений позволяет реализовать более компактные и быстродействующие приборы.

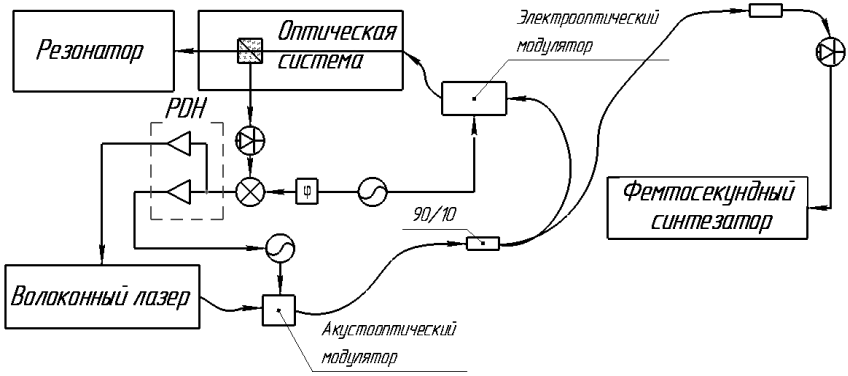


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Список литературы

1. Pendrill L.R. Refractometry and gas density // Metrologia. 2004. V. 41. P. 40-51.

2. Schmidt J.W., Gavioso R.M., May E.F., Moldover M.R. Polarizability of helium and gas metrology // Phys. Rev. Lett. 2007. V. 98. P. 1-4.

3. Silander I., Zelan M., Axner O., Arrhén F., Pendrill L., Foltynowicz A. Optical measurement of the gas number density in a Fabry–Perot cavity // Measurement Science and Technology. 2013. V. 24. No. 10. P. 105207.

4. Drever R.W.P., Hall J.L., Kowalski F.V., Hough J., Ford G.M., Munley A.J., Ward H. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator // Appl. Phys.B. 1983. V. 31. P. 97–105.

5. Axner O., Silander I., Forssen C., Zakrisson J., Zelan M. Assessment of gas molar density by gas modulation refractometry: A review of its basic operating principles and extraordinary performance // Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy 2021 V. 179. P. 106121.

6. Yoshinori T., Souichi T., Hajime Y., Youichi B., Tokihiko K. Challenges of an optical pressure standard in medium vacuum measurements // Measurement: Sensors. 2022. V. 22. P. 100371.

УДК 535(06)+004(06)

А.И. БУТЬ, А.М. ЛЯЛИКОВ
Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Беларусь

ПЕРСПЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ КОМБИНИРОВАННОГО ИНТЕРФЕРЕНЦИОННО-ТЕНЕВОГО МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ ЛАЗЕРНЫХ СРЕД И ЭЛЕМЕНТОВ ОПТИКИ

Показана возможность объединения ряда оптических способов исследования фазовых объектов, позволяющего создать комбинированный интерференционно-теневой метод измерительного контроля параметров элементов лазерной оптики, реализуемый в производственных условиях. Представлены экспериментальные результаты опробования комбинированного интерференционно-теневого метода измерительного контроля параметров элементов лазерной оптики при контроле качества лазерной матрицы, активированной сложными органическими соединениями и наночастицами.

A.I. BUT, A.M. LYALIKOV
Y. Kupala Grodno State University, Belarus

FEASIBILITY OF APPLICATION OF THE COMBINED INTERFERENCE-SHADOW METHOD FOR INVESTIGATING DEFECTS IN LASER MEDIA AND OPTICAL ELEMENTS

The possibility of combining a series of optical methods for studying phase objects is demonstrated, allowing the creation of a combined interference-shadow method for measuring and controlling the parameters of laser optical elements in industrial conditions. Experimental results of testing the combined interference-shadow method for measuring and controlling the parameters of laser optical elements during the quality control of a laser matrix activated with complex organic compounds and nanoparticles are presented.

Одной из проблем при создании мощных лазеров является обеспечение высокого качества, как активных лазерных сред, так и поляризационно-селективных лазерных элементов [1, 2]. Для определения качества такого типа лазерной оптики существуют достаточное количество оптических методов контроля, различающихся по чувствительности и точности измерений параметров. Обычно при производственном контроле при изготовлении лазерного элемента

ограничиваются одним или двумя наиболее простыми в реализации методами контроля, реализуемыми в производственных условиях.

В работе показана возможность объединения ряда оптических способов исследования лазерной оптики, позволяющего создать комбинированный интерференционно-теневой метод измерительного контроля параметров элементов лазерной оптики, реализуемый в производственных условиях. Простота в реализации и малая чувствительность к вибрациям комбинированного устройства контроля обеспечивается применением универсального интерферометра бокового сдвига без опорной ветви, работающего в режимах большого и малого бокового сдвига [3]. Получаемые интерферограммы при большом и малом сдвиге интерферирующих волн, прошедших контролируемый лазерный элемент, отображают информацию о функции распределения фазы (большой сдвиг) и первой производной этой функции, зондирующей волны. Причём при формировании интерферограмм малого сдвига возможна регулировка чувствительности измерений. Схема данного устройства также обеспечивает получение теневых картин посредством расфокусировки плоскости фотоприёмника с контролируемым лазерным элементом. В данном случае регистрируются теневые картины, отображают информацию о второй производной функции распределения фазы зондирующей световой волны [4]. Все картины регистрируются цифровой камерой.

Представлены экспериментальные результаты опробования комбинированного интерференционно-теневого метода измерительного контроля параметров элементов лазерной оптики при контроле качества лазерной матрицы, активированной сложными органическими соединениями и наночастицами. Выявлены зоны макродефекта матрицы.

Список литературы

1. Низьев В.Г // Квантовая электроника. 2023. Т. 53. № 4. С. 353-362.

2. Митрохин В.П. и др. // Квантовая электроника. 2022. Т. 52. № 7. С. 597-603.

3. Ляликов А.М. Высокочувствительная голографическая интерферометрия фазовых объектов: монография. Гродно: ГрГУ, 2010.

4. Креопалова Г.В. Оптические измерения. М.: Машиностроение. 1986.

УДК 535(06)+004(06)

А.Н. ТЮНИН, Д.Б. ЖМУРОВА, С.О. ВАСЕЦКИЙ,
В.В. БЕЛЯКОВ, М.А. ЖЕГЛОВ, С.Г. ШТЕК
Государственный научно-исследовательский институт приборостроения, Москва

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСЩЕПЛЕНИЯ ЧАСТОТЫ РЕЗОНАТОРА ВОЛНОВОГО ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ГИРОСКОПА С ПОМОЩЬЮ ИНТЕРФЕРОМЕТРА МАЙКЕЛЬСОНА

Рассмотрена задача определения расщепления частот собственных осей колебаний резонатора волнового твердотельного гироскопа. Разработано устройство на основе интерферометра Майкельсона, позволяющие определять параметры резонатора волнового твердотельного гироскопа. Приведена оценка погрешности измерения расщепления частоты резонатора.

A.N. TYUNIN, D.B. ZHMUROVA, S.O. VASETSKIY,
V.V. BELYAKOV, M.A. ZHEGLOV, S.G. SHTEK
State Research Institute of Instrument Making, Moscow

INVESTIGATION OF FREQUENCY SPLITTING OF THE RESONATOR WAVE SOLID-STATE GYROSCOPE USING A MICHELSON INTERFEROMETER

The problem of determining the splitting of the frequencies of the natural axes of oscillations of the resonator of a wave solid-state gyroscope is considered. A device based on Michelson interferometer is developed to determine the parameters of the resonator of the wave solid-state gyroscope. The estimation of the error of measuring the frequency splitting of the resonator is given.

Волновой твердотельный гироскоп (ВТГ) является одним из наиболее перспективных современных гироскопических датчиков. При производстве резонаторов ВТГ, как правило, возникают технологические дефекты, создающие расщепление частот собственных осей колебаний, приводящее к формированию квадратуры стоячей волны и уменьшению точности измерения угловой скорости [1]. В настоящее время расщепление собственных частот определяют по сигналам пьезоэлементов, приклеенных к донной части резонатора. Данный способ имеет ряд недостатков, поскольку параметры колебаний рабочей части резонатора определяют по колебаниям донной части, которая имеет собственную резонансную частоту, то есть этот метод является

косвенным. Также имеют место нелинейность преобразования механического воздействия в электрический сигнал и искажение измеряемого сигнала неупругими процессами в клеевых соединениях «пьезоэлемент – резонатор» [2]. Эти недостатки устранены в новом устройстве с бесконтактным оптическим способом измерений на основе интерферометра Майкельсона.

Предлагаемое устройство состоит из шагового двигателя, ударного механизма, волоконного интерферометра Майкельсона и блока обработки. Принцип работы устройства состоит в том, что колебания в резонаторе возбуждаются ударным способом, а измерение их параметров проводят в двух точках оболочки резонатора оптическим методом. При этом резонатор закрепляют на вал шагового двигателя, ударный механизм наносит лёгкие удары по кромке резонатора, возбуждая в нем стоячую волну с амплитудой порядка длины волны источника излучения интерферометра. Измерение отклонения кромки резонатора производятся с помощью волоконного интерферометра Майкельсона, который состоит из двух каналов считывания для узла и пучности колебательной картины. На фотоприёмниках формируются интерферометрические картины, токи фотоприёмников после усиления поступают на блок обработки, реализующий метод дискретного преобразования Фурье с определением частоты колебаний в каждом из каналов. Для поиска собственных осей колебаний резонатора разработан алгоритм, управляющий поворотом шагового двигателя и ударным механизмом.

В результате экспериментальных исследований получены характеристики предлагаемого устройства. Отношение сигнал/шум составило 85 дБ. Погрешность измерения расщепления частоты не превысило 0,01 Гц.

Предложенное устройство можно использовать на этапе изготовления для определения расщепления частоты и поиска собственных осей колебаний кварцевых и металлических резонаторов.

Список литературы

1. Лунин Б.С., Матвеев В.А., Басараб М.А. Волновой твердотельный гироскоп. Теория и технология. Монография. М.: Радиотехника, 2014.

2. Трутнев Г.А., Перевозчиков К.К., Назаров С.Б. Система съема и способы измерения колебаний резонатора твердотельного волнового гироскопа // Вестник МГТУ им. Баумана. Сер. Приборостроение. 2020. № 1. С. 50-63.

УДК 535(06)+004(06)

Н.Т. АВЛАСЕВИЧ, А.М. ЛЯЛИКОВ
Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Беларусь

ВЛИЯНИЕ НАСТРОЙКИ ОПОРНЫХ ПОЛОС НА ВЕЛИЧИНУ ОСТАТОЧНЫХ АБЕРРАЦИЙ В ВОСТАНОВЛЕННЫХ ИНТЕРФЕРОГРАММАХ

Проведён анализ и оценка величины остаточных аберраций при настройке на конечные полосы в восстановленных интерферограммах при реализации метода двухэкспозиционной голографической интерферометрии периодических структур. Установлена закономерность изменения величины остаточных аберраций от периода опорных полос в восстановленных интерферограммах.

N.T. AVLASEVICH, A.M. LYALIKOV
Y. Kupala Grodno State University, Belarus

INFLUENCE OF ADJUSTING REFERENCE BANDS ON THE VALUATION OF RESIDUAL ABERRATIONS IN RESTORED INTERFEROGRAMS

An analysis and assessment of the magnitude of residual aberrations was carried out when tuning to end bands in reconstructed interferograms when implementing the method of two-exposure holographic interferometry of periodic structures. A pattern has been established for changes in the magnitude of residual aberrations depending on the period of the reference bands in the reconstructed interferograms.

Для исследования объектов, характеризующихся периодической структурой, параметры которой изменяются в пространстве и во времени, требуется как определение формы и величины макродефекта, так и визуализация его развития во времени. Существуют два варианта схем записи голограммы периодической структуры. В первом случае, объектная и опорная волны формируются при дифракции света непосредственно на исследуемой структуре. Во втором случае, объектная волна формируется при дифракции света на исследуемой периодической структуре, а опорная волна не взаимодействует с исследуемой структурой.

Анализ оптических схем формирования двухэкспозиционных голограмм показал, что причины возникновения остаточных аберраций в восстановленных интерференционных картинах при оптической

обработке двухэкспозиционной голограммы не зависят от схемы записи голограммы [1].

Для обеспечения настройки на конечные полосы при восстановлении двухэкспозиционной голограммы запись второй экспозиции требует изменение несущей частоты голографической структуры на некоторую величину $\Delta\xi$, приводящее к смещению Δx световых волн в пространстве по сравнению с их положением при первой экспозиции.

Было установлено, что величина $\Psi(x,y)$ остаточных аберраций в этом случае определяется аберрациями $\varepsilon_1(x,y)$ системы записи голограммы периодической структуры по закону:

$$\Psi(x,y) = \Delta x \frac{\partial \varepsilon_1(x,y)}{\partial x}.$$

Учитывая, что величина Δx прямо пропорционально $\Delta\xi$, пропорциональна λ и $1/T$, то окончательно получим, определяющее величину $\Psi(x,y)$ остаточных аберраций

$$\Psi(x,y) \approx \frac{\lambda}{T} \frac{\partial \varepsilon_1(x,y)}{\partial x},$$

где $T = 1/\Delta\xi$,.

Таким образом, данный тип аберраций минимален для случая настройки интерференционных картин на полосу бесконечной ширины. С уменьшением периода опорных полос в восстановленных интерференционных картинах происходит рост величины остаточных аберраций, прямо пропорционально первой производной от функции $\varepsilon_1(x,y)$, описывающей искажения фазы в связи с прохождением элементов оптики и обратно пропорционально периоду опорных полос [2].

Погрешности измерений при расшифровке восстановленных двухэкспозиционных голограмм, возникающие из-за остаточных аберраций вследствие настройки на опорные полосы конечной ширины, относятся к систематическим погрешностям. Такого рода погрешности могут быть либо минимизированы на стадии формирования интерференционной картины, либо учтены при представлении конечного результата расшифровки интерферограммы.

Список литературы

1. Авласевич Н.Т., Ляликов А.М. // XII Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сб. науч. тр. М.: НИЯУ МИФИ, 2023. С. 614-615.

2. Ляликов А.М., Авласевич Н.Т. // Веснік Гродзенскага дзяржаунага універсітэта імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка,вылічальная тэхника і кіраванне. 2023. Т. 13. №; 2. С. 50-58.

УДК 535(06)+004(06)

П.Н. ЕМЕЛЬЯНОВ, А.В. ЗАБЕЛИН, А.А. СОМОВ,
В.И. ТЕЛЕШЕВСКИЙ
Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

ФУНКЦИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНТЕРФЕРОГРАММЫ БЕЛОГО СВЕТА

Описывается способ учёта влияния нескомпенсированной клиновидности пластин интерферометра Майкельсона на распределение яркости точек изображения интерферограммы. Предлагается применить данный алгоритм расшифровки интерферограмм в процессе автоматизации дублирующего метода измерения концевых мер длины на интерферометре Кёстерса. Результаты таких измерений могут быть использованы для проверки адекватности геометрической модели процесса измерения по методу совпадения дробных частей.

P.N. EMELYANOV, A.V. ZABELIN, A.A. SOMOV,
V.I. TELESHEVSKYI
Moscow State University of Technology "STANKIN"

FUNCTION FOR WHITE LIGHT INTERFEROGRAM COMPUTER SIMULATION

A method is described for taking into account the influence of the uncompensated wedge shape of the Michelson interferometer plates on the brightness distribution of the interferogram image points. It is proposed to apply this algorithm for deciphering interferograms in the process of automating a duplicate method for measuring gauge length gauges on a Kösters interferometer. The results of such measurements can be used to check the adequacy of the geometric model of the measurement process using the method of matching fractional parts.

Параметры метода совпадения дробных частей порядка интерференции с высокой вероятностью связаны со свойствами специальной геометрической модели – диаграммы порядков интерференции [1]. Для проверки адекватности данной модели необходимо использовать дублирующую измерительную процедуру, отличную от метода совпадения дробных частей. Самый оптимальный способ основан на автоматическом счёте полос, аналогично методу, использованному Альбертом Майкельсоном и Рене Бенуа для сравнения эталона метра с длиной волны света. Однако более простым аналогом может стать метод относительных измерений в белом свете.

В случае интерференции белого света на форму кривой яркости точек интерферограммы (рис. 1) начинает заметно влиять нескомпенсированная клиновидность пластин интерферометра Майкельсона [2]. Это проявляется, в частности, в неодинаковой яркости полос слева и справа от самой тёмной ахроматической полосы интерферограммы (рис. 1).

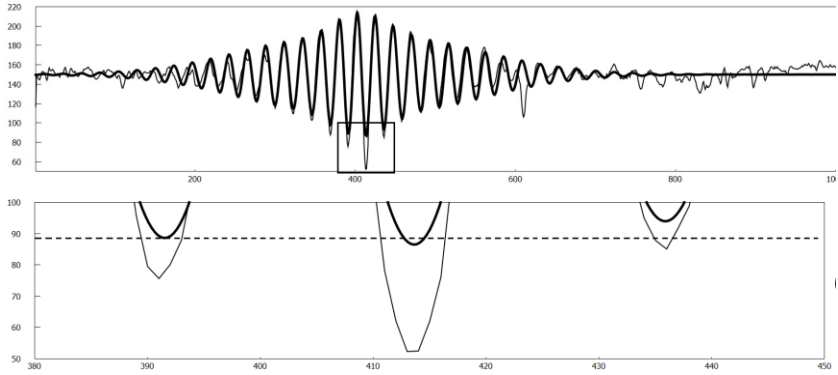


Рис. 1. Интерферограмма белого света (тонкая линия) и её модель (жирная линия)

Модель интерферограммы основана на выполнении операции численного интегрирования по длинам волн видимого спектра [3] функции косинуса, аргумент δ которого зависит от разности длин плеч интерферометра L_1 и L_0, угла φ между его зеркалами и угла нескомпенсированного стеклянного клина Φ с поправкой по формуле Зельмеера на зависимость коэффициента преломления стекла n от длины волны света (учитывается также размер поля зрения в метрах w_μ и в пикселях w_p).

$$\delta(x)=\frac{2\pi}{\frac{\lambda}{2}}\left(\left(tg(\phi)\left(\frac{w_\mu}{w_p}x-\frac{w_\mu}{2}\right)+\left(L_1-L_0\right)\right)-tg(\Phi)\left(\frac{w_\mu}{w_p}x-\frac{w_\mu}{2}+s_0\right)\left(n\left(10^6\lambda\right)-1\right)\right)$$

Список литературы

1. Забелин А.В. // Измерительная техника. 2011. № 7. С. 8-12.

2. Коломийцов Ю.В. Интерферометры. Основы инженерной теории, применение. Л.: Машиностроение, 1976.

3. Al-Saeed T., Khalil D. Dispersion compensation in moving-optical-wedge Fourier transform spectrometer // Applied Optics. 2009. V. 48. P. 3979-3987.

УДК 535(06)+004(06)

А.В. БЕЛАШОВ, А.А. ЖИХОРЕВА, П.С. БУТОРИН,
А.А. СЕМЕНОВ, Д.М. БЕЛЬТЮКОВА, И.В. СЕМЕНОВА,
О.С. ВАСЮТИНСКИЙ
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ФАЗОВОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ЖИВЫХ КЛЕТОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЫСОКОЙ И НИЗКОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОГЕРЕНТНОСТЬЮ

В работе представлены результаты сравнительного анализа двух методов количественной фазовой визуализации цитологических образцов с использованием когерентного и частично когерентного излучения. Проведён сравнительный анализ качества восстановления фазовых изображений клеток методом внеосевой цифровой голографии и методом количественной фазово-контрастной микроскопии с использованием частично-когерентного излучения. Сделаны выводы о степени влияния когерентного шума на полученные данные об исследуемом объекте. Показано, что наличие когерентного шума при использовании лазерного источника излучения практически не оказывает влияния на определение интегральных параметров клеток, однако может заметно искажать фазовое запаздывание в локальной области, мешая детектированию отдельных клеточных структур.

A.V. BELASHOV, A.A. ZHIKHOREVA, P.S. BUTORIN,
A.A. SEMENOV, D.M. BELTUKOVA, I.V. SEMENOVA,
O.S. VASYUTINSKII
Ioffe Physical Technical Institute of the RAS, Saint-Petersburg

COMPARATIVE ANALYSIS OF QUANTITATIVE PHASE IMAGING OF LIVING CELLS USING COHERENT AND PARTIALLY COHERENT RADIATION

We report a comparative analysis of the performance of two methods of quantitative phase imaging utilizing coherent and partially coherent radiation. An analysis of the reconstruction quality of phase images recorded using off-axis digital holography and spatial light interference microscopy was performed. An impact of coherent noise on the data obtained was estimated. We have found that coherent noise has virtually no effect on the evaluation of integral cell parameters, although it may distort data on phase shift in local areas, which makes difficult the detection of small intracellular structures.

В настоящее время методы количественной фазовой визуализации всё чаще применяются в биологии и медицине для исследования цитологических и гистологических образцов. Разные подходы к восстановлению фазового набега, вносимого прозрачными объектами в волновой фронт, обладают своими преимуществами и недостатками, влияющими на сферу их применения и погрешности измерения.

Анализ фазовых изображений, восстановленных с использованием когерентного и низкокогерентного излучения, продемонстрировал наличие заметных искажений фазового изображения при использовании когерентных источников излучения. Отклонения фазового распределения обусловленные лишь когерентным шумом, могут составлять более 0.15 радиан, что существенно уменьшает визуальное качество изображения. При рассмотрении поперечных сечений фазовых распределений, полученных от одних и тех же объектов с использованием разных методов цифровой голографии, становится видно, что наличие когерентного шума зачастую мешает различить мелкие структуры с локальными максимумами и минимумами фазового запаздывания, которые отлично видны в случае использования низкокогерентного излучения. Когерентный шум в некоторых случаях делает плохо различимыми границы клеток на фазовых изображениях, что также может мешать автоматической сегментации исследуемых объектов.

С другой стороны, в ряде случаев анализ фазовых изображений биологических объектов предполагает вычисление лишь довольно обобщённых параметров, таких как средний фазовый набег, внесённый клеткой в волновой фронт, среднеквадратичное отклонение фазового набега, площадь проекции клетки. Анализ этих характеристик клеток, выполненный на фазовых изображениях, полученных при использовании когерентной и низкокогерентной цифровой голографии, позволил убедиться в отсутствии сильных искажений данных, обусловленных наличием когерентного шума. Относительная погрешность определения этих параметров при сравнении результатов измерения характеристик одних и тех же клеток, анализируемых разными методами цифровой голографии, оказалась невысокой, а усреднение этих величин по выборке из 15 - 20 клеток практически полностью нивелировало влияние когерентного шума. С другой стороны, при анализе отдельных органелл и исследовании мелких внутриклеточных структур, а также их изменений предпочтительным является использование низкокогерентных методов.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 21-72-10044.

УДК 535(06)+004(06)

Л.А. МАКСИМОВА[1], В.П. РЯБУХО[1,2]
[1]Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов
[2]Национальный исследовательский Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

ПОПЕРЕЧНАЯ ПРОСТРАНСТВЕННАЯ КОГЕРЕНТНОСТЬ КВАЗИМОНОХРОМАТИЧЕСКОГО ВОЛНОВОГО ПОЛЯ С ШИРОКИМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ СПЕКТРОМ: ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

С помощью численного моделирования получены в поперечном сечении квазимонохроматического волнового поля с широким пространственным спектром пространственные распределения комплексной амплитуды поля. В графической форме получены функции поперечной когерентности поля и определены длины его поперечной когерентности при различной ширине пространственного спектра.

L.A. MAKSIMOVA[1], V.P. RYABUKHO[1,2]
[1]Institute of Precision Mechanics and Control, Russian Academy of Sciences, Saratov
[2]Saratov National Research State University named after N.G Chernyshevsky

TRANSVERSE SPATIAL COHERENCE OF A QUASI-MONOCHROMATIC WAVE FIELD WITH A WIDE SPATIAL SPECTRUM: NUMERICAL SIMULATION

Using numerical modeling, spatial distributions of the complex field amplitude were obtained in the cross section of a quasi-monochromatic wave field with a wide spatial spectrum. The functions of the transverse coherence of the field are obtained in graphical form and the lengths of its transverse coherence are determined for different widths of the spatial spectrum.

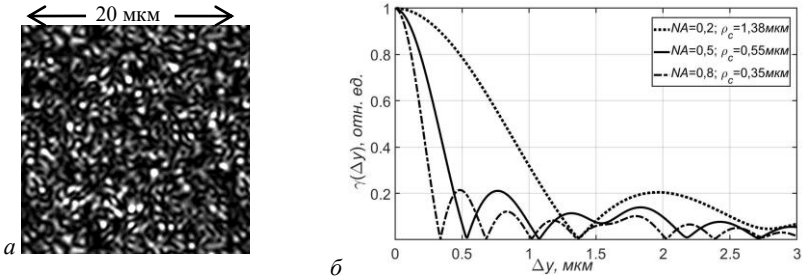
Функция поперечной когерентности волнового поля определяется с помощью теорем Ван Циттерта–Цернике или Винера–Хинчина, обобщённой для случайного поля. Компьютерное моделирование поля комплексных амплитуд случайного волнового поля позволяет исследовать его корреляционные свойства численным образом, в частности поперечную когерентность в зависимости от параметров частотного $g(k)$ и пространственного спектров поля (рис. 1). Поле комплексных амплитуд $U(x, y)$ в поперечном сечении можно определить как суперпозицию плоских волн со всевозможными пространственными частотами k_x, k_y в

пределах пространственного спектра поля с заданной угловой числовой апертурой *NA* со случайными начальными фазами $\varphi(k_x, k_y)$ в интервалах различной величины в пределах 0÷2π:

$$U(x,y)=\int_{k_1}^{k_2} g(k)\left[\int_{-\infty}^{+\infty}\int U(k_x,k_y)P(k_x,k_y)\exp\left[i\left(k_x x+k_y y\right)\right]dk_x dk_y\right]dk, \quad (1)$$

где $g(k)$ - частотный спектр, $k=2\pi/\lambda$, $U(k_x,k_y)=A\exp\left(i\varphi(k_x,k_y)\right)$ - комплексный пространственный спектр, $P(k_x, k_y)$ - функция апертуры пространственного спектра поля. Для определения функции когерентности $\Gamma(\Delta x,\Delta y)$ поля $U(x, y)$ использовалась формула:

$$\Gamma(\Delta x,\Delta y)=\sum_{x=x_1}^{x_2}\sum_{y=y_1}^{y_2}U(x,y)U^{*}(x-\Delta x,y-\Delta y)=\mathrm{F}^{-1}\left\{\left|\mathrm{F}\left(U(x,y)\right)\right|^2\right\}. \quad (2)$$



а *б*

Рис. 1. Смоделированная картина флуктуаций поля с *NA* = 0,5 в поперечном сечении (*а*), функции поперечной когерентности поля (*б*): λ_0 = 0,55 мкм, $\Delta k = k_2 - k_1 \approx 0$, ρ_c – длина поперечной когерентности поля (координата первого минимума Γ(Δ*y*))

Для длины когерентности ρ_c получено выражение $\rho_c=\lambda/2NA$, которому с высокой точностью соответствуют длины когерентности, определяемые по графикам функции когерентности $\Gamma(\Delta x,\Delta y)$. Также показано, что поперечная длина когерентности квазимонохроматического волнового поля, получаемого при суперпозиции плоских вол с разными случайными фазами, не зависит от интервала вариации начальных фаз $\varphi(k_x, k_y)$, а зависит от ширины и формы апертуры $P(k_x, k_y)$ пространственного спектра поля, ширины и формы его частотного спектра $g(k)$.

УДК 535(06)+004(06)

Д.А. РАДНАТАРОВ[1], П.В. КОЗЬМИНА[1], И.В. ГРОМОВ[1],
К.В. СЕРЕБРЕННИКОВ[1], А.Ю. КОХАНОВСКИЙ[1,2],
С.М. КОБЦЕВ[1]
[1]Новосибирский государственный университет
[2]Университет ИТМО, Санкт-Петербург

НОВЫЙ МЕТОД ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ

В работе представлена экспериментальная реализация нового метода преобразования лазерного пучка с помощью фазового пространственного модулятора света. Представлен метод расчёта фазовых масок для преобразования произвольного лазерного пучка в пучок с заданными профилями интенсивности и фазы. Приведены результаты экспериментов по преобразованию лазерных пучков в пучки с различными (Гауссовым, равномерным) поперечными профилями интенсивности и плоским волновым фронтом.

D.A. RADNATAROV[1], P.V. KOZMINA[1], I.V. GROMOV[1],
K.V. SEREBRENNIKOV[1], A.Yu. KOKHANOVSKY[1,2],
S.M. KOBTSEV[1]
[1]Novosibirsk State University
[2]ITMO University, Saint-Petersburg

NEW METHOD OF BEAM SHAPING

The paper presents an experimental implementation of the laser beam shaping method using a phase spatial light modulator. A method for calculating phase masks for converting a laser beam into a beam with given intensity and phase profiles is presented. The results of experiments on converting laser beams into beams with different (Gaussian, uniform) transverse intensity profiles and a plane wavefront are presented.

В последние десятилетия, манипулирование лазерными пучками стало ключевым инструментом в областях, таких как оптическая микроскопия, лазерное охлаждение атомов, лазерные пинцеты, биофотоника, нанофотоника, оптоинформатика и квантовые вычисления. Однако, для оптимизации этих приложений, необходимо разработать методы преобразования лазерных пучков в пучки с заданным профилем интенсивности и фазы.

Цель данной работы – представить новый подход к преобразованию лазерных пучков. Мы предлагаем метод, который позволяет формировать

пучки с произвольными распределениями интенсивности и фазы, что значительно расширяет возможности применения лазерных систем.

Метод основан на использовании фазового пространственного модулятора света, который позволяет практически произвольным образом изменять волновой фронт падающего излучения. В данном случае используется оптическая схема с двойным отражением от рабочей поверхности модулятора (рис. 1). При первом взаимодействии пучка с модулятором волновой фронт меняется таким образом, чтобы в плоскости модулятора при следующем отражении сформировался пучок с заданным профилем интенсивности. При втором отражении происходит коррекция падающего волнового фронта.

Особенностью представленного метода является то, что в нем применён новый алгоритм расчёта фазовых масок, который позволяет формировать пучки с гладким и\или равномерным профилем интенсивности, а не с заполнением контура пучка спекл-структурами, как при классической реализации алгоритмов типа Гершберта–Сэкстона, которые обычно используются для расчёта дифракционных оптических элементов.

Одним из достоинств данного подхода является его универсальность, он может использован не только для преобразования гауссового пучка в заданный, но и для преобразования произвольного пучка в гауссов пучок, что позволяет, например, решить задачу коррекции выходного пучка диодных лазеров.

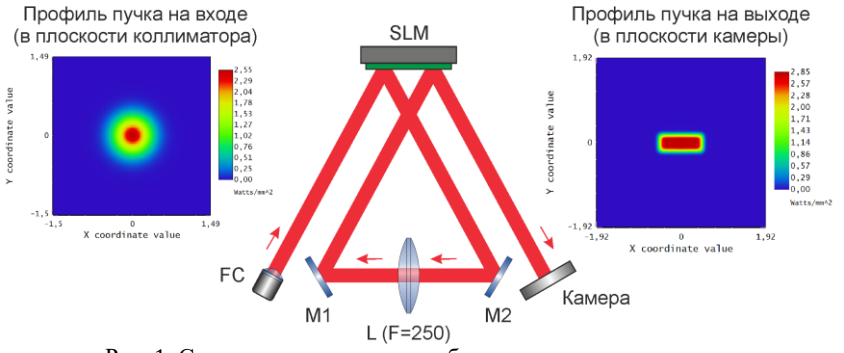


Рис. 1. Схема установки для преобразования лазерного пучка:
SLM – пространственный модулятор света, FC – волоконный коллиматор с расширителем пучка, M1, M2 – плоским зеркала, L – собирающая линза с фокусным расстоянием 250 мм, оптическая длина пути от SLM до линзы и от линзы до SLM равны фокусном расстоянию

УДК 535(06)+004(06)

С.С. НЕЖЕВЕНКО, К.В. ЕЖОВА
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

РАЗРАБОТКА МЕТОДА АНАЛИЗА ВОЛНОВОГО ФРОНТА ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ, СОДЕРЖАЩИХ ИЗОТРОПНЫЕ СРЕДЫ, С УЧЁТОМ ВЛИЯНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ ПАДАЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В работе представлен метод использования алгоритма, задачей которого является выполнение поляризационного расчёта хода лучей и исследование изменения состояния их поляризации при взаимодействии с оптическими поверхностями. Рассмотрена возможность восстановления волнового фронта монохроматической волны с учётом состояния поляризации падающего на систему излучения.

S.S. NEZHEVENKO, K.V. EZHOVA
ITMO University, Saint-Petersburg

DEVELOPMING A METHOD OF WAVEFRONT ANALYSIS OF OPTICAL SYSTEMS CONTAINING ISOTROPIC MEDIUMS, CONSIDERING THE POLARIZATION INFLUENCE OF INCIDENT RADIATION

The paper presents a method of using an algorithm, the task of which is to perform a polarization calculation of the path of rays and study the change in the state of its polarization state in result of interacting with optical surfaces. Taking into account the state of polarization of incident radiation the possibility of reconstructing of the wavefront of a monochromatic wave is considered.

В зависимости от формы и материала оптический элемент может оказывать различное воздействие на состояние поляризации проходящего поляризованного излучения [1]. В основном на это влияют линейный дихроизм, фазовое запаздывание и деполяризация излучения [2]. Актуальность исследования связана с тем, что более чёткое понимание поляризационной чувствительности позволит точнее выбирать форму оптических поверхностей, что приведёт к усилению или уменьшению влияния на поляризацию проходящего излучения [1].

Целью данной работы является получение характера распределения поляризации в пятне рассеяния в плоскости изображения и его зависимость от состояния поляризации входного излучения.

Алгоритм использует множественные переходы от глобальных к локальным координатам и от локальных к глобальным [2]. Это происходит в связи с тем, что процесс расчёта изменения состояния поляризации на оптической поверхности в локальных координатах хорошо известен, а в глобальных удобнее производить расчёт хода луча между поверхностями. Объединяя данные методы, можно получить матрицу взаимодействия луча с поверхностью в глобальных координатах P [1, 2]:

$$P_q = O_{out,q} \cdot J_q \cdot O_{in,q'}^{-1} \quad (1)$$

где $O_{out,q'}, O_{in,q}$ – матрицы перехода от локальных координат к глобальным и наоборот, J_q – расширенная матрица Джонса для преломления или отражения, q – номер оптической поверхности.

Рассчитав матрицы P_q для каждой поверхности, можно последовательным их перемножением получить матрицу для всей оптической системы, которая вкупе с вектором Джонса входного излучения позволит получить выходной результат. Конечно же, таким методом можно восстановить и начальный волновой фронт, проведя обратные вычисления.

По мнению авторов, результаты требуют дальнейшего исследования, для лучшего изучения поляризационной чувствительности как параметра оптической системы.

Список литературы

1. Kukushkin D.E., Zhukova T.I., Bakholdin A.V., et al. // Applied Optics. 2022. V. 61. No. 17.

2. Chipman R.A., Lam W.S.T., Young G. Polarized Light and Optical Systems. CRC Press, 2019.

Д.Ю. ХАРИТОНОВ, А.А. КУЗНЕЦОВ
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ

ПРОГРАММНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ МОДУЛЯТОРА МАХА–ЦЕНДЕРА

В качестве демонстрационного примера рассматривается оптическая схема модулятора Маха–Цендера, работающего в ближней инфракрасной области спектра 1,55 мкм с общей шириной волноводов 100 мкм. Показано, что радиус изгиба в 2,5 мм обеспечивает передачу примерно 95 % мощности. За счёт использования предложенной методики можно построить графики пропускания и нормы электрического поля в COMSOL Multiphysics.

D.Yu. KHARITONOV, A.A. KUZNETSOV
The Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI

SOFTWARE TOOLS FOR MODELING THE MACH–ZENDER MODULATOR

As a demonstration example, the optical scheme of the Mach–Zender modulator operating in the near-infrared region of the spectrum of 1,55 microns with a total waveguide width of 100 microns is considered. It is shown that a bending radius of 2,5 mm ensures the transmission of approximately 95 % of the power. By using the proposed technique, it is possible to construct transmission graphs and electric field norms in COMSOL Multiphysics.

Рассмотрим оптическую схему модулятора Маха–Цендера (рис. 1), работающего в ближней инфракрасной области спектра 1,55 мкм с общей шириной волноводов 100 мкм [1]. Входная волна подаётся в направленный ответвитель. Мощность на входе распределяется поровну на два выходных волновода из первого направленного ответвителя. Эти волноводы образуют два плеча интерферометра Маха–Цендера. К одному из плеч можно приложить электрическое поле, чтобы изменить показатель преломления материала и, таким образом, изменить фазу волны, распространяющейся через это плечо. Затем две волны объединяются в другую волну, направленную 50/50. Изменяя подаваемое напряжение, можно непрерывно контролировать количество света, выходящего из выходных волноводов. Распространённым материалом для изготовления волноводных модуляторов является ниобат лития $LiNbO_3$ [2].

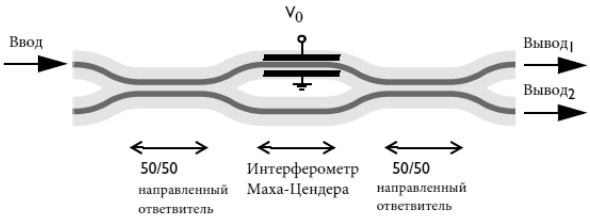


Рис. 1. Оптическая схема модулятора Маха–Цендера

Основная задача заключается в определении минимального радиуса изгиба, обеспечивающего низкие потери. На рис. 2 показана передача мощности для S-образного изгиба. Как видно, радиус изгиба в 2,5 мм обеспечивает передачу примерно 95 % мощности. Потеря составляет 5 % при фиксированном радиусе изгиба равным 2,5 мм. Модель реализована в 2D-геометрии, но может быть расширена до полноценного 3D-моделирования [3].

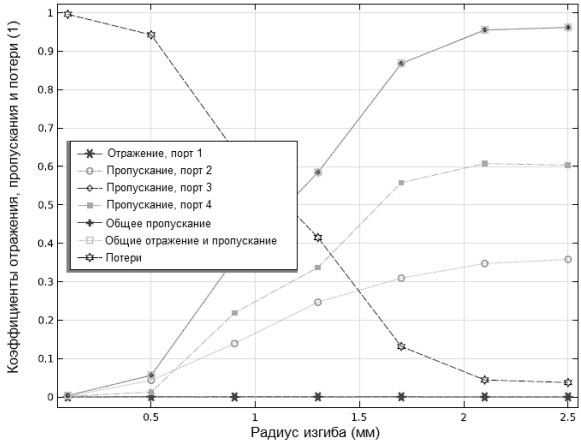


Рис. 2. Пропускание через S-образно изогнутый волновод в зависимости от радиуса кривизны изгиба

Список литературы

1. Slepov N.N. Optical fiber converters and modulators // Electronics: science, technology, business. 2000. No. 6. P. 6-10.

2. CRC Handbook of Chemistry and Physics. Taylor and Francis Group, LLC, 2008-2009.

3. Seimetz M. High-order modulation for optical fiber transmission. Berlin: Springer. 2009.

УДК 535(06)+004(06)

А.А. ДЬЯЧЕНКО[1], В.П. РЯБУХО[1,2]
[1]*Национальный исследовательский Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского*
[2]*Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов*

ФОРМИРОВАНИЕ ЧАСТОТНОГО СПЕКТРА ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО ПОЛЯ СЛОИСТОГО МИКРООБЪЕКТА В ОПТИЧЕСКОЙ МИКРОСКОПИИ

Рассмотрено теоретическое описание процессов формирования частотного спектра интерференционного поля слоистого микрообъекта в оптической микроскопии при освещении его источником с конечной шириной угловой апертуры. Показано влияние на структуру этого спектра оптической толщины объекта и угловой апертуры освещения. Проведён анализ структуры моделированных интерференционных спектров.

A.A. DYACHENKO[1], V.P. RYABUKHO[1,2]
[1]*Saratov National Research State University*
[2]*Institute of Precision Mechanics and Control of the RAS, Saratov*

FORMATION OF THE FREQUENCY SPECTRUM OF THE INTERFERENCE FIELD OF LAYERED MICROOBJECTS IN OPTICAL MICROSCOPY

Theoretical description of the frequency spectrum formation of the interference field of a layered microobjects in optical microscopy with illumination by a source with a finite angular aperture is considered. The influence of the optical thickness of the object and the angular aperture of illumination on the structure of this spectrum is shown. The structure of the simulated interference spectra is analyzed.

В случае использования в системе оптического микроскопа для регистрации формируемого слоистым микрообъектом оптического поля спектрометра, вместо цветного фотодетектора можно перейти от анализа изображений [1, 2], к анализу частотных интерференционных спектров.

На рис. 1 представлено смоделированное двумерное распределение интенсивности в частотном спектре интерференционного поля, сформированного объектом с различными оптическими толщинами. На полученных изображениях видно, что при увеличении угловой апертуры освещения, происходит сдвиг частотного спектра, и падение контраста

интерференционных осцилляций, хорошо заметное при больших оптических толщинах.

На рис. 2 показаны результаты моделирования частотного интерференционного спектра в зависимости от оптической толщины слоя, при различных значениях угловой апертуры освещающего поля. На данных рисунках появление интерференционных осцилляций, при достаточно больших значениях толщины. Как показывает анализ, полученных результатов, то появление осцилляций наиболее отчётливо наблюдается при толщине слоя порядка 1,5 - 2 мкм. Кроме этого отмечается существенной падение амплитуды интерференционных осцилляций, что является следствием уменьшения взаимной когерентности волновых полей, отражённых гранями слоя [3].

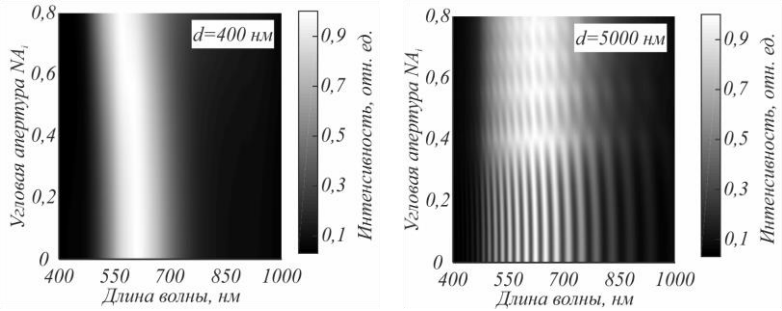


Рис. 1. Интенсивность частотного спектра в зависимости от угловой апертуры

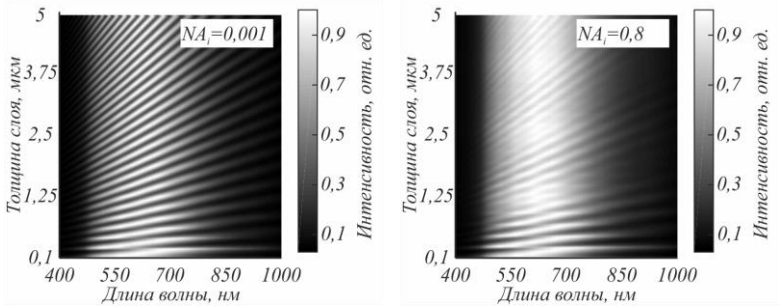


Рис. 2. Интенсивность частотного спектра в зависимости от оптической толщины

Список литературы

1. Дьяченко А.А., Рябухо В.П. // Компьютерная оптика. 2017. Т. 41. № 5. С. 670-679.

2. Дьяченко А.А., Максимова Л.А., Рябухо В.П. // Компьютерная оптика. 2018. Т. 42, № 6. С. 959-969.

3. Максимова Л.А., Мысина Н.Ю., Дьяченко А.А. и др. // Оптика и спектроскопия. 2020. Т. 128. № 1. С. 80-94.

УДК 535(06)+004(06)

А.А. ЖИХОРЕВА, М.В. БЕЛАШОВ[1], П.С. БУТОРИН,
А.В. БЕЛАШОВ, И.В. СЕМЕНОВА, О.С. ВАСЮТИНСКИЙ
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
[1]Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ФЛУОРЕСЦЕНТНЫХ МИКРОСФЕР, ВЫПОЛНЕННЫХ ИЗ ПОЛИСТИРОЛА, С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ ОПТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ И ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИИ

В работе представлены результаты применения методов оптической спектроскопии и цифровой голографии для измерения оптических параметров флуоресцентных микросфер, в частности для определения их показателя преломления, спектра флуоресценции, а также времени затухания флуоресценции. Измерение показателя преломления микросфер проводилось посредством восстановления распределений интегрального фазового набега, внесённого микросферами в проходящий волновой фронт, при их инкубировании в средах с разными показателями преломления. Для исследования спектральных параметров была создана оптическая установка, позволяющая измерять спектр флуоресценции и проводить время-разрешённую регистрацию сигналов флуоресценции.

A.A. ZHIKHOREVA, M.V. BELASHOV[1], P.S. BUTORIN,
A.V. BELASHOV, I.V. SEMENOVA, O.S. VASYUTINSKII
Ioffe Physical Technical Institute of the RAS, Saint-Petersburg
[1]ITMO University, Saint-Petersburg

INVESTIGATION OF THE OPTICAL PROPERTIES OF POLYSTYRENE-BASED FLUORESCENT MICROSPHERES USING OPTICAL SPECTROSCOPY AND DIGITAL HOLOGRAPHY

We report optical properties of the polystyrene-based fluorescent microspheres. The refractive index, excitation and fluorescence spectra of the microspheres were determined using optical spectroscopy and digital holography, the fluorescence lifetime was obtained using the TCSPC technique. The refractive index of the fluorescent microspheres was measured by reconstruction and analysis of integral phase shift distributions induced by the microspheres incubated in several media with different refractive indices. Investigation of spectral characteristics of the fluorescent microspheres was carried out using an optical setup, allowing for estimation of

fluorescence spectra and time-resolved detection of fluorescence signal by time-correlation single-photon counting technique.

Флуоресцентные микросферы применяются в широком ряде прикладных задач, связанных с оптической микроскопией, проточной цитометрией и взаимодействием с живыми клетками в ряде экспериментов in vitro. Такие микросферы могут быть использованы для апробации новых методов оптической микроскопии, измерения функции рассеяния точки, определения некоторых оптических характеристик микроскопических систем, манипуляций с помощью оптических пинцетов связанными с ними объектами, а также визуализации потоков жидкостей.

В данной работе нами было проведено определение некоторых оптических характеристик флуоресцентных микросфер диаметром 2 мкм. Для измерения показателя преломления микросфер был использован метод цифровой голографической микроскопии, реализованный с использованием интерферометра Маха–Цендера и He-Ne лазера, обеспечивающего регистрацию высококонтрастных интерференционных картин благодаря высокой временной и пространственной когерентности. Нами проводилась регистрация цифровых голограмм и восстановление распределений интегрального фазового набега микросфер, помещённых в воду, пропиленгликоль и глицерин, обладающих разными показателями преломления. Принимая во внимание известные показатели преломления растворителей, сферическую форму и размер исследуемых объектов, из распределений интегрального фазового набега была проведена оценка показателя преломления микросфер. В результате усреднения полученных данных было установлено, что средний показатель преломления исследуемого объекта составляет 1.591 со среднеквадратичным отклонением этой величины 0.003.

Исследование спектральных характеристик флуоресцентных микросфер показало, что максимум флуоресценции наблюдается на длине волны 512 нм, а максимум спектра возбуждения составляет 480 нм. Полученные спектры возбуждения и флуоресценции близки к спектральным характеристикам флуоресцеина, из чего можно сделать вывод, что именно этот флуоресцентный краситель вероятно использовался при производстве флуоресцентных микросфер. Анализ время-разрешённых сигналов флуоресценции полистирольных микросфер показал одноэкспоненциальную кинетику затухания флуоресценции с временем затухания 3.4 ± 0.3 нс, что также близко к типичным характеристикам флуоресцеина и свидетельствует о вероятном его использовании для окраски микросфер.

УДК 535(06)+004(06)

А.С. ЕЗЕРСКИЙ[1], А.В. ЧЕРНЫХ[1], Н.В. ПЕТРОВ[1,2]
[1]Университет ИТМО, Санкт-Петербург
[2]Харбинский инженерный университет, Циндао, Китай

УСТРАНЕНИЕ КОЛЬЦЕВЫХ ДЕФЕКТОВ ОСЕВЫХ ГОЛОГРАММ, ПОЛУЧАЕМЫХ В ЦИФРОВОМ ГОЛОГРАФИЧЕСКОМ МИКРОСКОПЕ, ОСНОВАННОМ НА ЛИНЗЕ С ЭФФЕКТОМ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФАЗЫ

В работе описан метод численной фильтрации регистрируемых голограмм для улучшения качества получаемого фазового распределения. При использовании предложенного метода возможно значительно улучшить получаемое изображение, устранив кольцевые дефекты от паразитных дифракционных порядков, при этом сохранив информацию об объекте.

A.S. EZERSKII[1], A.V. CHERNYKH[1], N.V. PETROV[1,2]
[1]ITMO University, Saint-Petersburg
[2]Harbin Engineering University, Qingdao, China

ELIMINATION OF RADIAL DEFECTS IN AXIAL HOLOGRAMS OBTAINED IN A DIGITAL HOLOGRAPHIC MICROSCOPE BASED ON A GEOMETRIC PHASE LENS

The paper describes a method for numerical filtering of recorded holograms to improve the quality of the resulting phase distribution. When using the proposed method, it is possible to significantly improve the resulting image by eliminating radial defects from spurious diffraction orders, while preserving information about the object.

В настоящее время создание оптических схем устойчивых к вибрациям, которые позволяют регистрировать амплитудно-фазовые распределения исходного волнового фронта, является перспективным направлением в биомедицинских приложениях и оптического контроля структуры поверхностей. Цифровой голографический микроскоп, основанный на линзе с эффектом геометрической фазы [1], которая позволяет преобразовывать исходное линейно-поляризованное излучение, разделяя его на два различных пучка с разнонаправленными круговыми поляризациями, позволяет получать как амплитудные, так и фазовые изображения объекта [2]. При этом, такой микроскоп устойчив к вибрациям за счёт использования схемы интерферометра общего пути. Однако, из-за бинарной структуры геометрической фазовой линзы

возникает множество вторичных дифракционных порядков, продуцирующие интерференционный шум в виде кольцевых структур, которые невозможно удалить при помощи классических методов, таких как фурье-фильтрация и сглаживание sin/cos фильтром [3].

Схема голографического микроскопа и восстановленное фазовое изображение представлены на рис. 1.

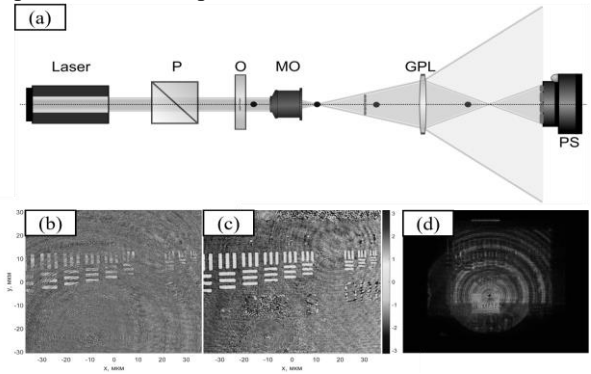


Рис. 1. Схема голографического микроскопа с геометрической фазовой линзой: P – призма Глана–Тейлора, O – плоскость расположение исследуемого объекта, MO – объектив микроскопа, GPL – геометрическая фазовая линза, PS – поляризационный матричный фотодетектор (a); восстановленное фазовое изображение объекта (b); фазовое изображение после фильтрации (c); распределение амплитуды численно распространённого поля, содержащего несколько дифракционных порядков (d)

Для осуществления фильтрации производится численное распространение восстановленного волнового фронта в плоскость фокусировки основного дифракционного порядка методом расчёта углового спектра [4]. Так как возникающие после линзы с эффектом геометрической фазы порядки фокусируются на различных расстояниях, в этой плоскости возможно выделить основной порядок путём наложения численной апертуры, после чего осуществляется распространение обратно в плоскость регистрации. При этом необходимо произвести аналогичные действия с волновым фронтом без объекта для последующего восстановления. Результат применения алгоритма представлен на рис. 1c.

Список литературы

1. Chernykh A.V., et al. // Optics InfoBase Conference Papers. 2021.
2. Chernykh A.V., et al. // Proc. SPIE. 2021. V. 11898.
3. Gutmann B., Weber H. // Applied Optics. 1998. V. 37. No. 32. P. 7624-7631.
4. Georgieva A.O., et al. // Atmospheric and Oceanic Optics. 2022. V. 35. No. 3. P. 258-265.

УДК 535(06)+004(06)

В.Н. НАВНЫКО, Д.С. БЛОЦКАЯ, Г.В. КУЛАК, С.М. ШАНДАРОВ[1]
Мозырский государственный педагогический университет им. И.П. Шамякина, Беларусь
[1]Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

МОДУЛЯЦИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ КРИСТАЛЛА InP: Fe ПРИ ЗАПИСИ ГОЛОГРАММЫ

Изучена зависимость нормальной составляющей изменения компонент обратного тензора диэлектрической проницаемости фоторефрактивного полупроводникового кристалла InP:Fe от направления волнового вектора голографической решётки в кристаллографической системе координат. Установлены направления, вдоль которых нормальная составляющая обратного тензора достигает наибольших значений.

V.N. NAUNYKA, D.S. BLOTSKAYA, G.V. KULAK, S.M. SHANDAROV[1]
Mozyr State Pedagogical University named after I.P. Shamyakin, Belarus
[1]Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

MODULATION OF DIELECTRIC PERMITTIVITY OF InP: Fe CRYSTAL BY HOLOGRAPHIC RECORDING

The dependence of the normal component of the change in the components of the inverse tensor of the dielectric permittivity of the photorefractive semiconductor crystals InP:Fe on the direction of the wave vector of the holographic grating in the crystallographic coordinate system has been studied. The directions along which the normal component of the inverse tensor reaches the highest values have been determined.

Выходные энергетические характеристики фазовой голограммы (дифракционная эффективность, коэффициент усиления) во многом определяются амплитудой модуляции диэлектрической проницаемости фоторефрактивного кристалла. Как известно [1], амплитуда модуляции может быть существенно увеличена за счёт выбора оптимальной ориентации волнового вектора голограммы в кристаллографической системе координат. Нахождению таких направлений для фоторефрактивного кристалла InP: Fe и посвящена настоящая работа.

Для нахождения изменения компонент обратного тензора диэлектрической проницаемости, возникающих при записи фазовой голограммы в кубическом фоторефрактивном кристалле, применялись

выражения, представленные в [2]. Материальные параметры InP: Fe, которые были использованы при расчётах, приведены в [3, 4].

На рис. 1 представлена поверхность, отображающая зависимость максимального значения χ^{max} нормальной составляющей изменения компонент обратного тензора диэлектрической проницаемости кристалла InP:Fe от ориентации волнового вектора голограммы **К** относительно кристаллографических осей $x_1 \| [100]$, $x_2 \| [010]$ и $x_3 \| [001]$. При построении поверхности χ^{max}(**К**) принималось следующее правило: если параметр χ^{max} имеет положительный знак, то соответствующая точка поверхности окрашивается в белый цвет, а если χ^{max} имеет отрицательное значение – в чёрный цвет. Для нахождения экстремальных направлений вектора **К**, вдоль которых достигаются наибольшие значения параметра χ^{max}, на рис. 1 дополнительно приведена секущая плоскость, которая параллельна (110) и проходит через начало системы координат.

На рис. 2 представлен след соприкосновения секущей плоскости и поверхности χ^{max}(**К**). Светлая линия соответствует пересечению секущей плоскости с белой составляющей фигуры, а тёмная линия – с чёрной. Пунктирная окружность является дополнительным построением и соответствует наибольшему значению χ^{max}, равному 2.62. Как видно из рис. 1 и 2, пунктирная окружность касается сечения поверхности χ^{max}(**К**) вдоль диагоналей куба, параллельных поворотным осям третьего порядка. Отсюда следует, что экстремальными направлениями поверхности χ^{max}(**К**) являются кристаллографические оси вида <111>.

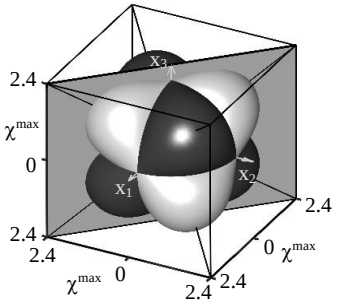


Рис. 1. Поверхность χ^{max}(**К**)

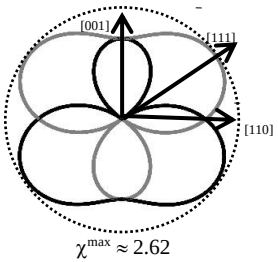


Рис. 2. Сечение поверхности χ^{max}(**К**)

Список литературы

1. Навныко В.Н., Шепелевич В.В., Шандаров С.М. // ЖПС. 2020. Т. 87 (4). С. 658.
2. Шандаров С.М., Шепелевич В.В., Хатьков Н.Д. // Опт. и спектр. 1989. Т. 67 (4). С. 819.
3. Dargus A., Kundrotas J. Handbook on physical properties of Ge, Si, GaAs, InP. Vilnius, 1994.
4. Навныко В.Н. // Квантовая электроника. 2022. Т. 52 (8). С. 731.

УДК 535(06)+004(06)

Д.С. РАСТРЫГИН, С.Н. ШАРАНГОВИЧ
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАННЫЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ ФПМ-ЖК ДИФРАКЦИОННЫЕ СТРУКТУРЫ С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ ПЕРИОДОМ

В данной работе в результате численного моделирования продемонстрированно увеличение ширины селективного отклика, дифрагированного пучка методом изменения периода записываемых голографических дифракционных структур, а также их мультиплексировании.

D.S. RASTRYGIN, S.N. SHARANGOVICH
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

MULTIPLEXED HOLOGRAPHIC PPM-LC DIFFRACTION STRUCTURES WITH VARIOUS PERIOD

In this paper, as a result of numerical modeling, an increase in the width of the type of selective response, diffracted beam, is demonstrated by changing the period of recorded holographic diffraction structures, as well as their multiplexing.

Ранее в работах [1 - 3] была продемонстрирована возможность увеличения ширины селективного отклика при помощи мультиплексированных ГДС и ГДС с изменяющимся периодом сформированных в ФПМ-ЖК [2].

Целью данной работы является численное моделирование дифракционных характеристик чирпированных мультиплексированных ГДС, сформированных в ФПМ-ЖК.

С помощью численного моделирования исследован процесс дифракции света на мультиплексированной чирпированной ГДС с ФПМ-ЖК, для которой путём последовательной записи под углами будут записаны две дифракционные структуры. Для моделирования использовались следующие параметры: $d_n = 20$ мкм – ширина ФПМ-ЖК слоя; $t_n = 60$ мкм – толщина буферного слоя; $n_{LC}^o = 1.535$ и $n_{LC}^e = 1.680$ – обыкновенный и необыкновенный показатель преломления ЖК; $n_p = 1.535$ – показатель преломления полимера; $\theta_b = 8$ градусов – угол Брэгга; $\lambda = 633$ нм – длина волны записи и считывания;

$0,5\nabla^2\varphi^{n,n_h} = \{3\cdot10^5; 5\cdot10^5\}$ 1/мм – отклонение модуля вектора **K** от среднего значения. Последовательная запись осуществлялась под углами $\psi = \{-7,7^\circ\}$ градусов – для мультиплексированной ГДС и $\psi = \{-13,13^\circ\}$ $\psi = \{-15,15^\circ\}$ градусов – для мультиплексированной чирпированной соответственно. На рис. 1 приведены нормированные относительно максимального значения зависимости дифракционной эффективности от угла поворота образца для одиночной и мультиплексированной ГДС, а также для мультиплексированной чирпированной ГДС.

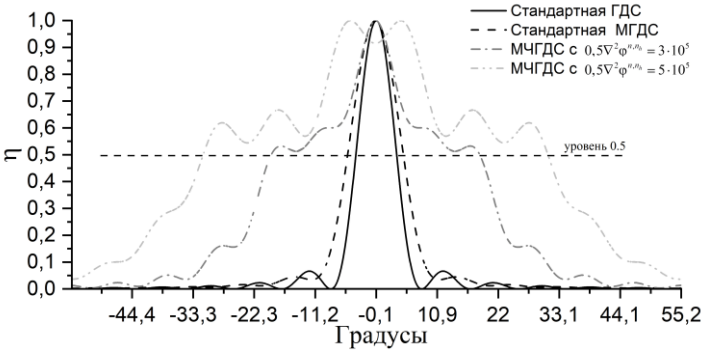


Рис. 1. Угловая селективность стандартной, мультиплексированной и мультиплексированной чирпированной ГДС

Как видно из рис. 1, при мультиплексированной записи однослойной ГДС достигается увеличение ширины угловой селективности по уровню 0,5 до 1,5 раз, а при записи мультиплексированной чирпированной ГДС – $0,5\nabla^2\varphi^{n,n_h} = 3\cdot10^5$ до 4 раз и $0,5\nabla^2\varphi^{n,n_h} = 5\cdot10^5$ до 7 раз.

Таким образом, формирование путём последовательной записи чирпированной ГДС, позволяет достичь увеличения ширины угловой селективности стандартных однослойных ГДС.

Список литературы

1. Быков Д.А., Безус Е.А., Досколович Л.Л. // Компьютерная оптика. 2023. Т. 47, № 3. С. 341-349.

2. Долгирев В.О., Шарангович С.Н., Растрыгин Д.С. // Труды школы-семинара «Волны-2023». Нанофотоника, метаматериалы и фотонные кристаллы С. 47-50.

3. Dovolnov E., Sharangovich S.N., Sheridan J.T. // Photorefractive effects, materials, and devices 2005 // OSA Trends in Optics and Photonics Series (TOPS). 2005. P. 337-342.

УДК 535(06)+004(06)

Г.В. КУЛАК, В.Н. НАВНЫКО, Т.В. НИКОЛАЕНКО
Мозырский государственный педагогический университет им. И.П. Шамякина, Беларусь

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ АНИЗОТРОПНОЙ БРЭГГОВСКОЙ ДИФРАКЦИИ СВЕТА НА ПРОПУСКАЮЩИХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ФАЗОВЫХ РЕШЁТКАХ

Установлено, что при анизотропной брэгговской дифракции света на пропускающих голографических фазовых решётках при значительных величинах амплитуды возмущения показателя преломления среды, в прошедших дифракционных порядках имеет место значительный поворот плоскости поляризации дифрагированной волны, отсутствующий в отражённых дифракционных порядках.

G.V. KULAK, V.N. NAUNYKA, T.V. NIKOLAENKO
Mozyr State Pedagogical University named after I.P. Shamyakin, Belarus

POLARIZATION FEATURES OF ANISOTROPIC BRAGG DIFFRACTION OF LIGHT BY TRANSMISSION HOLOGRAPHIC PHASE GRATINGS

It is established that with anisotropic Bragg diffraction of light by transmitting holographic phase gratings under significant values of the amplitude of the perturbation of the refractive index of the medium, in the transmitted diffraction orders there is a significant rotation of the plane of polarization of the diffracted wave, which is absent in the reflected diffraction orders.

Для записи голографических решёток (ГР) широкое применение находят различные регистрирующие среды (фотополимеризующие акрилатные композиции, фотохромные среды органического и неорганического типа, фоторефрактивные полимеры и другие), в которых амплитуда модуляции показателя преломления достигает величин $\Delta n \sim 10^{-2} - 10^{-1}$ [1, 2]. В настоящей работе теоретически исследованы поляризационные особенности анизотропной брэгговской дифракции света на пропускающих ГР в кубических нецентросимметричных фоторефрактивных кристаллах в условиях френелевского отражения. Расчёты проводились для плоскопараллельного слоя из кристалла GaAs в случае анизотропной дифракции линейно поляризованного излучения с

длиной волны $\lambda_0 = 1.15$ мкм на ГР (рис. 1). Предполагалось, что слой материала ($n_2 = 3.18$), в котором сформирована ГР, граничит с воздухом ($n_1 = n_3 = 1$).

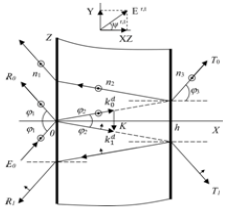


Рис. 1. Схема считывания ГР в слое (XZ – плоскость дифракции, R_0, R_1 – коэффициенты отражения, T_0, T_1 – коэффициенты пропускания, φ_1 (φ_2) – угол падения (преломления), φ_3 – угол преломления)

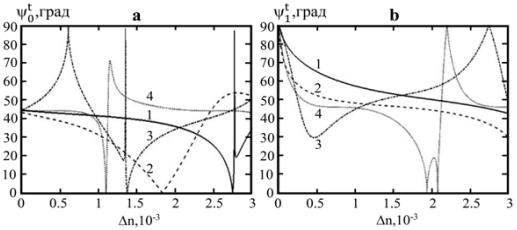


Рис. 2. Зависимость азимутов поляризации прошедшей дифрагированной волны нулевого порядка ψ_0^t (a) и первого порядка ψ_1^t(b) на ГР в слое от амплитуды изменения показателя преломления Δn при различных толщинах слоя h: 1 (1), 1.5 (2), 2 (3), 2.5 мм (4) (кристалл *GaAs*, $n_1 = n_3 = 1$, $n_2 = 3.18$, $\lambda_0 = 1.15$ мкм, $\varphi_1 = 2^\circ$, $\psi_0 = 45^\circ$)

На рис. 2 представлены зависимости азимутов поляризации прошедших дифрагированных волн, отсчитываемых от плоскости дифракции XZ, нулевого (ψ_0^t) и первого (ψ_1^t) порядка от амплитуды модуляции показателя преломления слоя Δn. Из рис. 2 следует, что при расчёте поляризационных и энергетических характеристик дифрагированных световых волн для больших значений изменения показателя преломления ГР в условиях их считывания необходимо учитывать значительные отличия френелевских коэффициентов отражения дифрагированных волн на границах плоскопараллельного слоя. Показано, что периодические изменения коэффициентов пропускания дифрагированных волн при изменении азимута поляризации падающего света (ψ_0) обусловлены существенным различием френелевских коэффициентов отражения на границах слоя для s- и p- составляющих падающего света; в отражённых дифракционных порядках данные периодические изменения отсутствуют.

Список литературы

1. Барачевский В.А. // Опт. и спектр. 2018. Т. 124. С. 371.

2. Петров М.П., Степанов С.И., Хоменко А.В. Фоточувствительные электрооптические среды в голографии и оптической обработке информации. Л.: Наука, 1983.

УДК 535(06)+004(06)

Г.В. КУЛАК, В.Н. НАВНЫКО, Т.В. НИКОЛАЕНКО
Мозырский государственный педагогический университет им. И.П. Шамякина, Беларусь

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ БРЭГГОВСКОЙ ДИФРАКЦИИ СВЕТА НА ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ФАЗОВЫХ РЕШЁТКАХ

Показано, что при больших ширинах слоя, в котором размещается отражательная голографическая фазовая решётка, имеет место значительный поворот плоскости поляризации отражённых и прошедших дифрагированных волн при изменении амплитуды модуляции слоя, обусловленный френелевским отражением света на границах слоя.

G.V. KULAK, V.N. NAUNYKA, T.V. NIKOLAENKO
Mozyr State Pedagogical University named after I.P. Shamyakin, Belarus

POLARIZATION FEATURES OF BRAGG DIFFRACTION OF LIGHT BY REFLECTION HOLOGRAPHIC PHASE GRATINGS

It is shown that at large thickness of the layer in which the reflection holographic phase grating is placed, there is a significant rotation of the polarization plane of the reflected and transmitted diffracted waves when the modulation amplitude of the layer changes due to the Fresnel reflection of light at the boundaries of the layer.

При исследовании дифракции света на фазовых решётках использована система уравнений связанных волн первого порядка для света в отражённых и прошедших пучках, решение которой найдено численными методами [1]. Граничные эффекты при дифракции света на объёмных синусоидальных фазовых решётках отражательного типа исследованы в [2]. Высокое значение величины фотоиндуцированного изменения показателя преломления материала среды, регистрирующей голограмму ($\Delta n = 5 \cdot 10^{-3}$), отмечено в [3]. В настоящем работе исследованы особенности отражения и пропускания света плоскопараллельным слоем, модулированным синусоидальной отражательной голографической фазовой решёткой (ГР). Расчёты проводились для слоя, где размещалась ГР, на основе среды «реоксан» [3]. Рассмотрена изотропная дифракция линейно поляризованного излучения с длиной волны $\lambda_0 = 0.6328$ мкм для произвольной линейной поляризации падающего света с азимутом поляризации ψ по отношению к плоскости дифракции XZ (рис. 1).

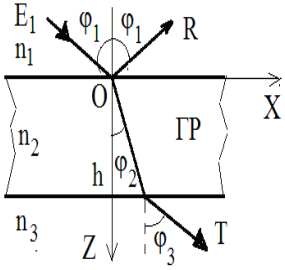


Рис. 1. Схема отражения и пропускания света от ГР, расположенной в плоскопараллельном слое (E_1 – падающая, R(T) – отражённая (прошедшая) волны, n_1 – показатель преломления покрытия; n_2 – показатель преломления плоскопараллельного слоя; n_3 – показатель преломления подложки, ГР – голографическая решётка

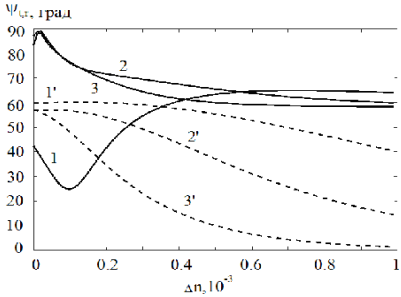


Рис. 2. Зависимость азимута поляризации отражённой (ψ_r) и прошедшей (ψ_t) дифрагированной на ГР световой волны в плоскопараллельном слое от индуцированного изменения показателя преломления Δn при различных толщинах слоя h: 0.25 (1), 0.5 (2), 1 мм (3) (реоксан, $n_2 = 1{,}49$, $n_1 = n_3 = 1$, $\lambda_0 = 0.6328$ мкм, $\varphi_1 = 2^\circ$, $\psi = 45^\circ$; —— – коэффициент отражения, ----- – коэффициент пропускания

На рис. 2 представлена зависимость азимута поляризации отражённого (ψ_r) и прошедшего (ψ_t) дифрагированного на ГР света от индуцированного изменения показателя преломления Δn слоя. Из рис. 2 следует, что вследствие различных значений коэффициентов френелевского отражения и пропускания дифрагированных волн *s*- и *p*- поляризации имеет место значительный поворот плоскости поляризации дифрагированной световой волны в отражённом и прошедшем дифракционном порядке. Наибольший поворот плоскости поляризации отражённых волн имеет место для больших ширин слоя $h = 1$ мм в интервале индуцированного изменения показателя преломления $\Delta n = 0.01 \cdot 10^{-3} \div 0.2 \cdot 10^{-3}$. Прошедшая световая волна испытывает существенный поворот плоскости поляризации в интервале $\Delta n = 0.4 \cdot 10^{-3} \div 10^{-3}$.

Список литературы

1. Rokushima K., Yamakita J., Mori, Tomanaga S. // IEEE Transaction on microwave theory and techniques. 1987. V. 35. P. 937-945.

2. Геворгян А.А. // Журн. техн. физ. 2007. Т. 77. С. 75-82.

3. Барачевский В.А. // Опт. и спектр. 2018. Т. 124. С. 371-399.

УДК 535(06)+004(06)

Н.М. ГАНЖЕРЛИ
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

ВЛИЯНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ В ТОНКИХ ПЛЁНКАХ НА ДИФРАКЦИОННУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГОЛОГРАММ

На примере слоёв халькогенидного стеклообразного полупроводника системы As-Se исследовано влияние интерференции в тонких плёнках на оптические характеристики материала и дифракционную эффективность голограмм с помощью измерения изменений величин отражения, пропускания и оптической разности хода лучей в процессе воздействия излучения He-Ne лазера на слой. Показано, что интерференционные явления в тонких плёнках приводят при изменении толщины слоя к различию этих характеристик, а также к колебанию дифракционной эффективности голограмм.

N.M. GANZHERLI
Ioffe Physical Technical Institute of the RAS, Saint-Petersburg

EFFECT OF INTERFERENCE IN THIN FILMS ON DIFRACTION EFFICIENCY OF HOLORAMS

Influence of the interference in thin films on optical characteristics of a material and the diffraction efficiency of holograms is studied. The effect was inxestigated using thin films of chalcogenide glassy semiconductors of the As-Se system. The changes in the values of reflection, transmission and optical difference of the beam path during the action of He-Ne laser radiation on the layer were measured. It is shown with changing layer thickness the interference phenomena in thin films lead to fluctuations of these characteristics as well as to fluctuations in the diffraction efficiency of holograms.

Целью работы было исследование влияния интерференции в тонких плёнках на оптические характеристики материала и дифракционную эффективность (ДЭ) голограмм при использовании в качестве светочувствительной среды халькогенидных стеклообразных полупроводников (ХСП) системы As-Se. ХСП являются перспективными материалами ввиду наличия высокого разрешения до 10000 мм$^{-1}$, фотостимулированных изменений коэффициента поглощения и показателя преломления наряду с присущим материалу высоким значением показателя преломления [1]. Последний факт требует учёта влияния интерференции в тонких плёнках на величины поглощения, пропускания, отражения, а также на величину ДЭ голограмм.

Исследовались слои толщиной 0,5 - 3,5 мкм. Воздействие на материал и регистрация голограмм осуществлялась излучением He-Ne лазера длиной волны 0,63 мкм. Неравномерность по толщине в результате напыления плёнки ХСП приводит к тому, что в отражённом или прошедшем свете можно наблюдать интерференционные полосы равной толщины. Толщина плёнки d в месте падения луча, соответствующая максимуму или минимуму отражения, вычисляется по известной формуле $d = \lambda m/2n\cos\beta$, где λ – длина волны в вакууме, n – показатель преломления плёнки, β – угол падения света на плёнку, m – целое число, причём чётные числа m соответствуют максимумам отражения, а нечётные – минимумам [2]. В случае падения света перпендикулярно поверхности слоя ХСП выбранного типа при $n = 2{,}8$ и $\lambda = 0{,}63$ мкм величины пропускания и отражения колеблются с периодом примерно 0,113 мкм при изменении толщины слоя из-за интерференционных эффектов, амплитуда колебания которых в свою очередь велика из-за высокого показателя преломления ХСП. Аналогичные колебания имеют место и в величине поглощения света в плёнке. С ростом толщины плёнки вследствие увеличения поглощения амплитуда колебаний уменьшается. Вследствие того, что плёнки обладают растущим под действием света поглощением, имеет место значительная неоднородность фотоиндуцированных изменений оптических характеристик ХСП по глубине слоя. Показано, что воздействие излучения происходит лишь в тонком приповерхностном слое ХСП, вследствие чего использование плёнок исследуемого типа с толщиной более 3 мкм нецелесообразно.

Регистрация голограмм пространственной частоты порядка 600 мм$^{-1}$ осуществлялось по симметричной схеме на слое с клинообразным по толщине напылением. Считывание голограмм проводилось в процессе записи вторым лазером с направлением поляризации излучения, ортогональным направлению поляризации записывающего излучения. Получено, что интерференция приводит к колебаниям максимально достижимой ДЭ с периодом порядка 0,113 мкм в зависимости от толщины слоя ХСП, существенных в области толщин до 1,5 мкм.

Влияние интерференции в тонких плёнках существенно для любых тонких светочувствительных слоёв, особенно в плёнках материалов с высоким показателем преломления.

Список литературы

1. Барачевский В.А. //Оптика и спектр. 2018. Т. 124. № 3. С. 371–399.

2. Михельсон А.В., Папушина Т.И. и др. Волновая оптика: учебное пособие. Под общ. ред. А.А. Повзнера. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2013.

УДК 535(06)+004(06)

Н.Т. АВЛАСЕВИЧ, А.М. ЛЯЛИКОВ
Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Беларусь

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ КАРТИНЫ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ГОЛОГРАММ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР, ЗАПИСАННЫХ В НЕКОГЕРЕНТНОМ СВЕТЕ

Установлены закономерности поведения вектора решётки опорных полос в восстановленных интерферограммах при использовании голограмм периодических структур, записанных в некогерентном свете в устройствах с дополнительной опорной дифракционной решёткой. Определены оптимальные условия записи двухэкспозиционной голограммы, позволяющие регулировать величину и направление опорных полос в восстановленной интерференционной картине.

N.T. AVLASEVICH, A.M. LYALIKOV
Y. Kupala Grodno State University, Belarus

RESTORATION OF THE INTERFERENCE PATTERN WHEN USING HOLOGRAMS OF PERIODIC STRUCTURES RECORDED IN INCOHERENT LIGHT

Regularities in the behavior of the reference fringe grating vector in reconstructed interferograms using holograms of periodic structures recorded in incoherent light in devices with an additional reference diffraction grating have been established. The optimal conditions for recording a two-exposure hologram have been determined, making it possible to adjust the size and direction of the reference fringes in the reconstructed interference pattern.

Метод двухэкспозиционной голографической интерферометрии, заключающийся в формировании пары голограмм исследуемого объекта при различных его состояниях и восстановлении интерференционной картины, получил широкую популярность при исследовании фазовых и диффузно-отражающих объектов [1, 2]. Основным достоинством данного метода является компенсация аберраций низкокачественной оптики оптических систем формирования голограмм.

При исследовании периодических или квазипериодических структур двухэкспозиционная голографическая интерферометрия имеет свои отличительные особенности от фазовых или рассеивающих объектов. В первую очередь, это особенность исследуемого периодического объекта

выполнять функцию оптического элемента для формирования объектной и опорной волны и возможность использования некогерентного освещения. Однако первые [3] оптические схемы формирования голограмм в некогерентном свете не позволяли плавно регулировать пространственную частоту и ориентацию полос голографической структуры. Такая особенность в дальнейшем затрудняла произвольную настройку опорных полос в интерферограмме при восстановлении двухэкспозиционной голограммы. Данный недостаток был устранён авторами в устройствах записи голограмм периодических структур в некогерентном свете с дополнительной опорной дифракционной решёткой, период и направление полос которой, характеризующиеся модулем вектора $\boldsymbol{P}$, строго согласованны с модулем вектора $\boldsymbol{X}$ периодической структуры исследуемого объекта [4].

Было показано, что при записи голограмм периодических структур в некогерентном свете в устройствах с дополнительной опорной дифракционной решёткой конец вектора $\boldsymbol{G}$ решётки формируемой голографической структуры описывает окружность в плоскости голограммы, причём радиус данной окружности определяется соотношением $\boldsymbol{P}/\boldsymbol{X}$ модулей векторов. При реализации метода двух экспозиций и при выполнении условия $\boldsymbol{P}/\boldsymbol{X} = const$, очевидно, что концы векторов решёток $\boldsymbol{G}_1$ и $\boldsymbol{G}_2$, сформированных голограмм первой и второй экспозиций, также будут описывать одну и ту же окружность радиуса $2\boldsymbol{R}$. Так как вектор $\boldsymbol{Y}$ решётки, образованной опорными полосами восстановленной интерферограммы определяется разностью $\boldsymbol{G}_1 - \boldsymbol{G}_2$, то, очевидно, что начало и конец вектора $\boldsymbol{Y}$ также расположены на данной окружности радиуса $2\boldsymbol{R}$.

Установлено, что оптимальным вариантом соотношением $\boldsymbol{P}/\boldsymbol{X}$ для реализации двухэкспозиционной голографической интерферометрии является случай $\boldsymbol{P}/\boldsymbol{X} < 1$. В этом случае модуль вектора $\boldsymbol{Y}$ решётки опорных полос изменяется от 0 до $4\boldsymbol{R}$ и может иметь произвольную ориентацию в плоскости восстановления интерферограммы.

Список литературы

1. Бекетова А.К. и др. Голографическая интерферометрия фазовых объектов. Л.: Наука, 1979.

2. Вест Ч. Голографическая интерферометрия. М.: Мир, 1982.

3. Ляликов А.М., Авласевич Н.Т. // Оптический журнал. 2019. Т. 86. № 3. С. 56-60.

4. Авласевич Н.Т., Ляликов А.М. // Проблемы физики, математики и техники. 2022. № 3. С. 7-12.

УДК 535(06)+004(06)

В.О. ДОЛГИРЕВ, С.Н. ШАРАНГОВИЧ
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМЫМИ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАННЫМИ ЧИРПИРОВАННЫМИ ФПМ-ЖК ДИФРАКЦИОННЫМИ СТРУКТУРАМИ

В данной работе продемонстрированы поляризационные характеристики дифрагированного светового поля с помощью численного моделирования, основываясь на модели дифракции произвольно поляризованных световых пучков на электрически управляемых мультиплексированных чирпированных голографических дифракционных структурах, сформированных в фотополимеризующихся композициях с нематическими жидкими кристаллами.

V.O. DOLGIREV, S.N. SHARANGOVICH
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

TRANSFORMATION OF POLARIZATION CHARACTERISTICS OF LIGHT BEAMS BY ELECTRICALLY CONTROLLED MULTIPLEXED CHIRPED PPM-LC DIFFRACTION STRUCTURES

In this paper, the polarization characteristics of a diffracted light field are demonstrated using numerical modeling based on a diffraction model of arbitrarily polarized light beams on electrically controlled multiplexed chirped holographic diffraction structures formed in photopolymerizing compositions with nematic liquid crystals.

Совершенствование дифракционных свойств голографических дифракционных структур (ГДС), сформированных в фотополимеризующихся композициях, остается актуальной задачей. Один из потенциальных методов для расширения угловых и спектральных характеристик таких структур является мультиплексированная запись чирпированных [1] ГДС. Применение же жидких кристаллов в их составе открывает дополнительные возможности для контроля дифракционных и поляризационных характеристик указанных структур [2]. Таким образом, целью данной работы является исследование преобразования поляризационных характеристик электрически управляемых мультиплексированных чирпированных ГДС с ФПМ-ЖК.

Основываясь на модели дифракции света из работы [2], для ГДС, в которой были последовательно записаны две дифракционные решётки под углами -9 и +9 градусов, с помощью численного моделирования были рассчитаны зависимости эллиптичности (ρ) и азимута поляризации (χ) дифрагированного светового поля от воздействия электрического поля (E) и считывающей световой волны с азимутом поляризации 30 градусов. При моделировании использовались следующие параметры: толщина ФПМ-ЖК слоя 13 мкм, длина волны записи и считывания 1550 нм, напряжение на слое $E = \{E_c; 1.2E_c; 1.6E_c\}$, угол Брэгга 8 градусов.

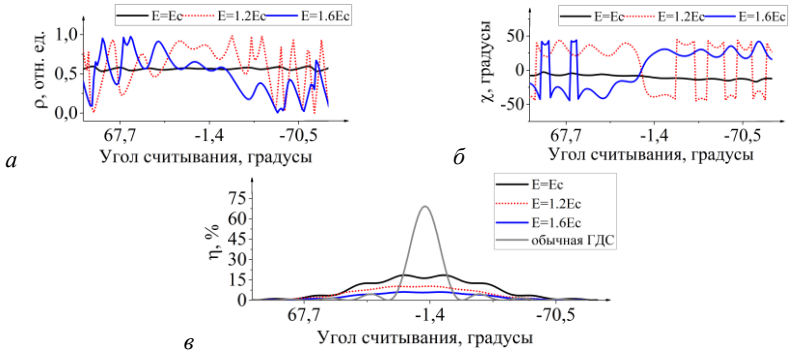


Рис. 1. Распределение эллиптичности (*а*), азимута (*б*) и угловой селективности (*в*) для дифрагированного светового пучка от угла считывания

Как видно из рис. 1*а*, зависимость эллиптичности от угла считывания при росте напряжения может меняться от 0 до 1 с переменной периодичностью. Для азимута (рис. 1*б*) угол также с ростом напряжения начинает периодично изменяться с 0 до -45 и +45 градусов. Дифракционная эффективность же при росте напряжения начинает падать по уровню и имеет небольшое смещение влево по угловой селективности. Вместе с тем, если сравнивать с обычной ГДС (рис. 1*в*), то коэффициент уширения угловой селективности для мультиплексированной чирпированной ГДС составил 3,9 раза.

Список литературы

1. Быков Д.А., Безус Е.А., Досколович Л.Л. // Компьютерная оптика. 2023. Т. 47, № 3. С. 341-349.

2. Долгирев В.О., Шарангович С.Н., Растрыгин Д.С. // Труды школы-семинара «Волны-2023». Нанофотоника, метаматериалы и фотонные кристаллы С. 47-50.

УДК 535(06)+004(06)

Н.К. ДЖАМАНКЫЗОВ, Ю.Х. ИСМАНОВ
Институт физики НАН Кыргызской республики, Бишкек

НАГРЕВ ФОТОТЕРМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В ЛАЗЕРНОМ ПОЛЕ

Получено соотношение, позволяющее анализировать поведение температуры поверхности записывающего слоя и дающее возможность установления температурных режимов записи информации в различных фототермических материалах.

N.K. DZHAMANKYZOV, Yu.Kh. ISMANOV
Institute of Physics of NAS of Kyrgyz Republic, Bishkek

HEATING OF PHOTOTHERMAL MATERIALS IN A LASER FIELD

A relationship has been obtained that allows one to analyze the behavior of the surface temperature of the recording layer and makes it possible to establish temperature conditions for recording information in various photothermal materials.

Основным элементом диэлектрико-полупроводниковой структуры (ДПС) является полупроводниковый слой, который служит одновременно преобразователем входной информации и регистрирующей её средой при фототермическом способе записи. В зависимости от соотношения полупроводникового слоя – d и глубины поглощения $1/\delta$ (δ – коэффициент поглощения), а также от соотношения и длины диффузии $L = \sqrt{at}$ (где a – температуропроводность полупроводникового слоя, t – длительность лазерного импульса) ДПС можно рассматривать как однослойную при $d > 1/\delta$ и $d > L$, которая и рассматривается далее.
Распределение источников тепловыделения в тонком полупроводниковом слое определяется характером этой интерференционной картины, сформированной двумя когерентными пучками с интенсивностями, описываемыми выражением для прямоугольного импульса

$$q(y,z) = q_0(z)[1 + m\cos(ky)], \qquad (1)$$

где $q_0(z)$ – усреднённая по объёму мощность тепловыделения; $k = 2\pi/\Lambda$ – пространственная частота, Λ, m – период и глубина модуляции плотности световой энергии в полупроводниковом слое; ($\Lambda = \lambda/2\cos\theta$ – период пространственной тепловой решётки, λ – длина волны лазерного излучения, θ – угол падения на слой светового пучка).

В общем случае q_0 является функцией координат z, и распределение температурного поля $T(y, z, t)$ в слое определяется решением уравнения теплопроводности с источником тепла (1)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}) + \frac{a}{\eta} q(y,z)\,. \qquad (2)$$

Границу $z = 0$ будем считать термоизолированной,

$$\frac{\partial T(y,0,t)}{dz} = 0\,, \qquad (3)$$

а поглощающий полупроводниковый слой достаточно толстым $d \to \infty$ чтобы влиянием подложки можно было пренебречь, то есть

$$T(y, d, t) = 0. \qquad (4)$$

Так как под $T(y, d, t)$ понимаем наведённую величину температурного поля, то начальным условием будет

$$T(y, z, 0) = T_0, \qquad (5)$$

где T_0 – температура внешней среды. Здесь a, η – коэффициенты температуропроводности и теплопроводности материала, соответственно. Решение уравнения с начальным условием (5) имеет вид

$$\Delta T(y,t) = q_0 \frac{at}{\eta}\left[1 + \frac{m}{k^2 at}(1 - e^{-k^2 at})\cos(ky)\right] = q_0 \frac{at}{\eta}\left[1 + M(k,t)\cos(ky)\right], \qquad (6)$$

где $M(k, t)$ – коэффициент глубины модуляции теплового поля имеет вид

$$M(k, t) = \frac{m}{k^2 at}(1 - e^{-k^2 at})\,. \qquad (7)$$

Выражение (6) позволяет анализировать поведение температуры поверхности записывающего слоя и применима для установления температурных режимов записи информации в различных фототермических материалах [1 - 5].

Список литературы

1 Dzhamankyzov N.K., Ismanov Y.Kh. Temperature modes of development of holograms recorded on photothermoplastic media heated by laser // Optical Engineering. 2018. V. 57. No. 6. P. 067103.

2. Джаманкызов Н.К., Исманов Ю.Х. Температурный режим проявления скрытого изображения голографической записи на фототермопластических носителях // VIII Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сбор. науч. тр. М.: НИЯУ МИФИ, 2019. С. 275-276.

3. Жумалиев К.М., Алымкулов С.А., Исманов Ю.Х., Исмаилов Д.А. Анализ голографических интерферограмм // Известия КГТУ им. И. Раззакова. 2016. № 3 (39). Ч. I. С. 56-60.

4. Исманов Ю.Х. Голографический эффект Тальбота в интерферометрии // Вестник КРСУ. 2015. № 5 (15). С. 101-103.

5. Исманов Ю.Х. Восстановление изображения волнами различной длины // Известия Национальной Академии наук Кыргызской Республики. 2015. № 4. С. 30-33.

УДК 535(06)+004(06)

В.В. МОГИЛЬНЫЙ[1], Э.А.ХРАМЦОВ[1,2], А.П.ШКАДАРЕВИЧ[2]
[1]Белорусский государственный университет, Минск
[2]Научно-технический центр «ЛЭМТ» БелОМО, Минск, Беларусь

ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ЗАПИСЬ В ОБЪЁМЕ ПОЛИМЕРА С БОКОВЫМИ АНТРАЦЕНОВЫМИ ГРУППАМИ

Показано, что под действием лазерного излучения $\lambda = 409$ нм в слоях полимера с боковыми антраценовыми группами развиваются реакции фотоокисления и фотодимеризации последних. Их совместный фоторефрактивный эффект при записи голографических решёток формирует периодические структуры с предельно возможной глубиной модуляции показателя преломления ($\Delta n \approx 0{,}02$ для $\lambda = 633$ нм). Обнаружены свидетельства участия фотоиндуцированных деформаций в формировании решёточных структур.

U.V. MAHILNY[1], E.A. KHRAMTSOV[1,2], A.P. SHKADAREVICH[2]
[1]Belarusian State University, Minsk
[2]Scientific and Technical Center «LEMT» of the BelOMO, Minsk

HOLOGRAPHIC RECORDING IN THE VOLUME OF POLYMER WITH SIDE ANTHRACENE GROUPS

It has been shown that under the influence of laser radiation $\lambda = 409$ nm in polymer layers with side anthracene groups, photooxidation and photodimerization reactions of the latter take place. Their combined photorefractive effect when recording holographic gratings forms periodic structures with the maximum possible depth of refractive index modulation ($\Delta n \approx 0.02$ for $\lambda = 633$ nm). Evidence was found for the participation of photoinduced deformations in the formation of grating structures.

Присоединение боковых антраценовых групп к полимерной цепи и сенсибилизация их фотоокисления атмосферным кислородом позволяет записывать объёмные голограммы с дифракционной эффективностью (ДЭ) порядка 10 %. Повышению ДЭ препятствуют ограниченная проницаемость материала для кислорода и особенности фоторефракции при фотоокислении [1]. При высокой (~ 1 моль/л) концентрации антраценовых групп (А) эффективна их фотодимеризация с фоторефрактивным эффектом, аналогичным фотоокислению ($\Delta n \approx 0{,}02$ для $\lambda = 633$ нм), но без ограничений, свойственных последнему. В настоящей работе экспериментально изучены фотопревращения А в полимерных слоях и запись в их объёме фазовых голографических

решёток (ФГР) излучением лазера с длиной волны 409 нм у длинноволновой границы поглощения А.

Облучение тонких (~ 1 мкм) слоёв полимера показало, что расходование А замедляется приблизительно десятикратно при наличии покровного слоя, препятствующего проникновению кислорода воздуха через границу. Это свидетельствовало о доминирующем вкладе фотоокисления при открытой границе, которое сенсибилизировали сами А. В слоях большей толщины с открытой границей вклад фотодимеризации, очевидно, более значителен. На рис. 1 приведена кинетика ДЭ при записи ФГР с периодом 5,4 мкм. Её анализ с помощью формулы для тонкой ФГР:

$$\eta = J_1^2(\Delta\varphi) = J_1^2\left(\frac{2\pi\Delta n l_0}{\lambda}\right),$$

где Δn – разница значений показателя преломления в максимумах и минимумах решёточной структуры, l_0 – толщина ФГР, позволила оценить кинетику Δn и сравнить её с кинетикой расходования А при фотодимеризации (рис. 2).

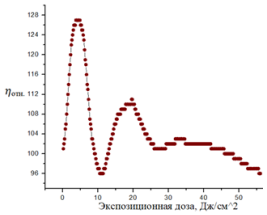


Рис. 1. Кинетика относительной ДЭ при записи ФГР в слое толщиной 33 мкм без доступа кислорода

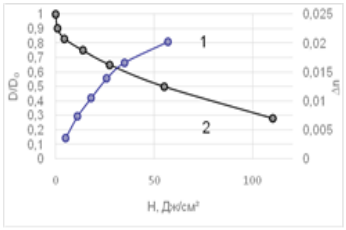


Рис. 2. Нарастание Δn (1) в структуре ФГР в сравнении с кривой расходования А при фотодимеризации (2)

Данные рис. 2 показывают, что в структуре решётки воспроизводится предельная модуляция показателя преломления. Для слоёв с открытой поверхностью и фотоокислением результат аналогичен. После прекращения записи ФГР её ДЭ падает на 10 - 11 % в течение суток, затем стабилизируется. Динамика ДЭ связывается с релаксацией механических напряжений, созданных продуктами фотореакций. Несинусоидальность объёмных ФГР (параметр Клейна больше 15), проявляющаяся как дифракция второго порядка, тоже может отражать подобные деформации.

Список литературы

1. Могильный В.В. и др. // Журнал прикл. спектроскопии. 2021. Т. 88, № 1. С. 159-165.

Ю.Х. ИСМАНОВ, Н.К. ДЖАМАНКЫЗОВ, С.А. АЛЫМКУЛОВ
Институт физики НАН Кыргызской республики, Бишкек

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЯ ГОЛОГРАММ

Вращательное мультиплексирование является частным случаем мультиплексирования фрактального типа. В работе показано, что отличием данного метода от мультиплексирования фрактального типа является то, что смещение во вращательном мультиплексировании является результатом вращения среды хранения.

Yu.Kh. ISMANOV, N.K. DZHAMANKYZOV, S.A. ALYMKULOV
Institute of Physics of NAS of Kyrgyz Republic, Bishkek

SOME FEATURES OF ROTATIONAL MULTIPLEXING OF HOLOGRAMS

Rotational multiplexing is a special case of fractal type multiplexing. The work shows that the difference between this method and fractal type multiplexing is that the displacement in rotational multiplexing is the result of rotation of the storage medium.

Мультиплексирование вращательного типа можно рассматривать как частный случай мультиплексирования фрактального типа (рис. 1).

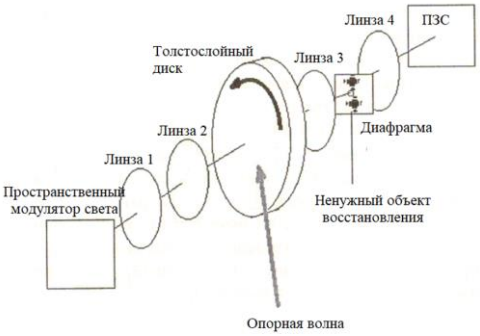


Рис. 1. Вращательное мультиплексирование в толстослойной структуре

Данный тип мультиплексирования особенно эффективен для хранения голограмм в достаточно тонкослойных средах. Подобно мультиплексированию фрактального типа в данном типе

мультиплексирования необходимой опорной волной восстанавливаются одновременно более одной голограммы. Однако, только результат восстановления одной голограммы оказывается несмещённым и фиксируется матрицей ПЗС. Отличием данного метода от мультиплексирования фрактального типа является то, что смещение во вращательном мультиплексировании является результатом вращения среды хранения. Из рис. 1 видно, что результаты восстановления ненужных голограмм отфильтровываются специальной диафрагмой, сохраняя при этом выделение и фиксацию матрицей ПЗС только нужной страницы информации.

На размер диафрагмы при записи информации в тонкослойных средах сильно влияет разрешение пространственного модулятора света, а вот толщина среды записи никак не определяет этот размер. Возможный путь увеличения информационной емкости толстослойных сред записи – это комбинация вращательного и углового мультиплексирований.

Существенным недостатком вращательного мультиплексирования является то, что, вращение диска вокруг собственной оси не позволяет реализовать поворот вокруг участка, на котором происходит запись голограмм, то есть происходит процесс мультиплексирования. Для осуществления такого поворота необходимо вращение диска сопровождать вращением непосредственно опорной волны. Это приводит к значительному усложнению конструкции считывающего и записывающего устройства. То есть для одновременного использования вращательного и углового мультиплексирований необходимо, чтобы вся система линз имела возможность осуществлять вращение вокруг нормали к толстослойному диску [1 - 6].

Список литературы

1. Исманов Ю.Х. Голографический эффект Тальбота в интерферометрии // Вестник КРСУ. 2015. № 5 (15). С. 101-103.

2. Исманов Ю.Х., Тынышова Т.Д. Улучшение характеристик интерферограмм, получаемых на выходе голографического интерферометра // X Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сбор. науч. тр. М.: НИЯУ МИФИ, 2021. С. 445-446.

3. Исманов Ю.Х., Тынышова Т.Д. Уменьшение объема вводимых данных при компьютерной обработке интерферограмм // VIII Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сбор. науч. тр. М.: НИЯУ МИФИ, 2019. С. 695-696.

4. Исманов Ю.Х., Тынышова Т.Д., Абдулаев А.А. Моделирование оптической системы, работающей при некогерентном освещении // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2020. № 3. С. 98-102.

5. Исманов Ю.Х. Восстановление изображения волнами различной длины // Известия Национальной Академии наук Кыргызской Республики. 2015. № 4. С. 30-33.

6. Ismanov Y.Kh., Tynyshova T.D., Aidaraliev Z.K. Wide-range holographic interferometer // Optical Engineering. 2018. V. 57(12). P. 124106.

УДК 535(06)+004(06)

М.В. ШИШОВА, А.Б. СОЛОМАШЕНКО, О.Л. АФАНАСЬЕВА,
В.В. МАРКИН, Д.С. ЛУШНИКОВ
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

ДИСПЛЕЙ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ НА ОСНОВЕ ГОЛОГРАММНЫХ ЗЕРКАЛ

В работе предложен вариант дисплея дополненной реальности, основанного на двух голограммных зеркалах: плоском и сферическом. Особенностью такой системы является высокие коэффициент отражения и спектрально-угловая селективность зеркал по сравнению с аналогами на основе диэлектрических покрытий. Описаны схемы записи и расчёт параметров голограммных зеркал, представлены результаты эксперимента. В предложенном дисплее дополненной реальности обеспечивается принцип мультифокальности, то есть воспроизведения виртуальных изображений на нескольких расстояниях относительно глаза наблюдателя. Это демонстрирует перспективность реализации дисплея с точки зрения компенсации конфликта вергенции и аккомодации.

M.V. SHISHOVA, A.B. SOLOMASHENKO, O.L. AFANASEVA,
V.V. MARKIN, D.S. LUSHNIKOV
Bauman Moscow State Technical University

AUGMENTED REALITY DISPLAY BASED ON HOLOGRAPHIC MIRRORS

The paper proposes an augmented reality display that utilize two types of holographic mirrors: flat and spherical. This system offers an advantage with its high reflection coefficient and selective spectral-angle properties compared to traditional dichroic coating alternatives. Work provides an in-depth description of the recording schemes and hologram mirror parameter calculations, along with the presentation of experimental results. The proposed augmented reality display incorporates multifocality – the ability to display virtual images at multiple distances from the observer's eye. This can compensate for the conflict of vergence and accommodation, indicating the work’s relevance.

К важным вопросам по разработке голограммных зеркал для устройств дополненной реальности относятся методика их расчёта в контексте оптической схемы, расчёт параметров схемы записи с учётом усадки фоточувствительного материала, оценка влияния параметров на параметры устройства в целом (например, на распределение яркости в выходном зрачке), особенности зрительного восприятия окружающего

пространства при наблюдении через набор голограммных зеркал, а также апробация работы дисплея в режиме мультифокальной системы [1]. Все эти аспекты рассмотрены в работе.

Схема компоновки зеркал показана на рис. 1. В любой точке плоского зеркало угловое отклонение между отражёнными и падающими лучами должно превышать его угловую селективность. Тем самым обеспечивается высокий коэффициент отражения при первичном отражении и высокий коэффициент пропускания при прохождении лучей через зеркало в обратном направлении. На рис. 1 показано ψ – необходимое угловое рассогласование в положении сферического зеркала относительно плоского для выдерживания этого условия. Оценка угловой селективности по теории связанных волн показала, что $\psi > 6\,^\circ$ [2].

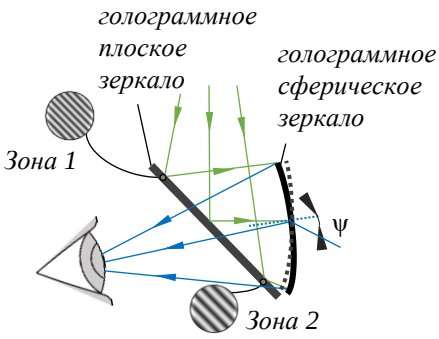


Рис. 1. Схема дисплея на базе

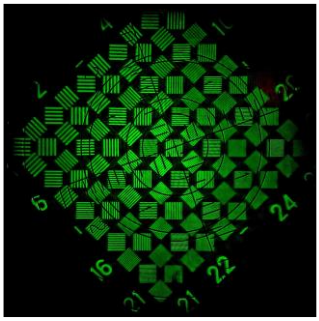


Рис. 2. Фотография миры

На основе предложенной схемы были записаны соответствующие голограммные оптические элементы в слое бихромированной желатины. Визуальную разрешающую способность дисплея можно оценить по тест объекту, показанному на рис. 2. Измеренное значение спектральной селективности при угле падения пучка $51\,^\circ$ для плоского зеркала составило $\delta_{\lambda 0,5} \approx 12$ нм. Для сферического зеркала измеренное значение спектральной селективности для центра поля составило $\delta_{\lambda 0,5} \approx 25$ нм.

Список литературы

1. Zhou Y., et al. // Optik. 2022. V. 270. P. 169942.
2. Kogelnik H. // Bell Labs Tech. J. 1969. V. 48(9). P. 2909-2947.

Т.Д. ТЫНЫШОВА, Ю.Х. ИСМАНОВ[1]
Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Бишкек
[1]Институт физики НАН Кыргызской республики, Бишкек

ИНФОРМАЦИОННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Голографическая система рассмотрена как многоступенчатая структура, каждая из ступеней которой влияет на вид конечной информации, фиксируемой голограммой. Проведён анализ влияния каждой из ступеней.

T.D. TYNYSHOVA, Yu.Kh. ISMANOV[1]
Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek
[1]Institute of Physics of NAS of Kyrgyz Republic, Bishkek

INFORMATION REPRESENTATION OF THE HOLOGRAPHIC PROCESS

The holographic system is considered as a multi-stage structure, each of the steps of which affects the type of ultimate information fixed by a hologram. An analysis of the influence of each of the steps was carried out.

Голографическая система рассмотрена как многоступенчатая структура, каждая ступень которой даёт определённый вклад в окончательную фиксацию информации, проходящей сквозь систему. На этапе ввода информации в голографическую систему формируется транспарант, зависящий от пространственной частоты. Эта зависимость задаётся переменными $\delta(1/\alpha_1\nu_x)$ и $\delta(1/\alpha_1\nu_y)$ – зависимость отношения сигнал/шум от пространственных частот ν_x,ν_y. Зависимость от координат можно приближённо задать с помощью величин $\beta_1(\alpha_1 x)=\beta_1(\alpha_1 y)=1$. Эти зависимости определены до границ страниц ввода информации $x=l_{x\max}$ и $y=l_{y\max}$. Вне этих границ $\beta(x)=\beta(y)=0$.

Второй этап – это, обычно, либо отдельная линза, либо система линз, осуществляющих преобразование Фурье. На данном этапе надо использовать линзы с низкими значениями аберрации и большой апертурой, что позволит избежать потерь высокочастотных составляющих изображений. Принимая во внимание тот факт, что в целом голографическая система осуществляет преобразование Фурье, можно записать соотношения, связывающие координаты x_2 и y_2 на выходе

голографической системы с амплитудными и фазовыми характеристиками пространственного спектра входного изображения, в виде $\nu_{x2} = x_2 / \lambda f$ и $\nu_{y2} = y_2 / \lambda f$.

Третий этап – это этап записи прошедшей сквозь голографическую систему пространственной информации на цифровой или аналоговый носитель. В этом случае присутствуют потери в частотной области, величина которых определяется значениями $\delta(\nu_{xout})$ и $\delta(\nu_{yout})$.

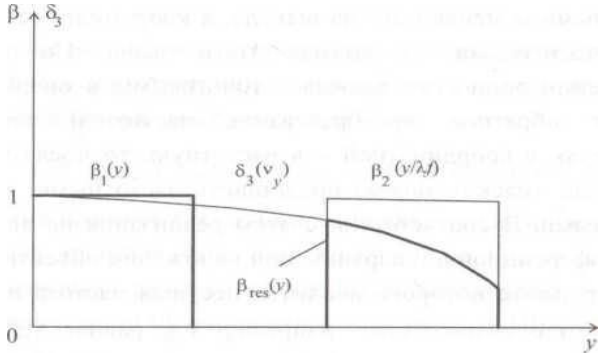


Рис. 1. Изменение величин β_1, β_2, δ_3 и β_{res} вдоль оси *y* выходной плоскости

Рис. 1 показывает, что основной вклад в скорость изменения отношения сигнал/шум в выходной плоскости даёт значение δ_3, определяющее частотную характеристику голограммы [1 - 7].

Список литературы

1. Maripov A., Ismanov Y. Interferometer based on the Talbot effect in holography // J. Optics (Paris). 1995. V. 26. No. 1. P. 25-28.

2. Maripov A., Ismanov Y., Omyrzakov K. Four-channel wide-range holographic interferometer // Proc. SPIE. 2003. V. 5144. P. 606-612.

3. Исманов Ю.Х., Тынышова Т.Д. Уменьшение объема вводимых данных при компьютерной обработке интерферограмм // VIII Международной конференции по фотонике и информационной оптике: сбор. науч. тр. М.: НИЯУ МИФИ, 2019. С. 695-696.

4. Ismanov Y., Maripov A. Holographic Talbot interferometer // Proc. SPIE. 2000. V. 4149. P. 213-220.

5. Исманов Ю.Х. Восстановление изображения волнами различной длины // Известия Национальной Академии наук Кыргызской Республики. 2015. № 4. С. 30-33.

6. Исманов Ю.Х., Алымкулов С.А. Саморепродуцирование регулярных объектов с ограниченной апертурой // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. 2015. № 7. С. 3-5.

УДК 535(06)+004(06)

А.В. ПАВЛОВ, Н.А. СОЛОВЬЕВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

РЕАЛИЗАЦИЯ НЕКОММУТАТИВНОЙ ЛОГИКИ МЕТОДОМ ГОЛОГРАФИИ ФУРЬЕ: ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Рассмотрена задача реализации некоммутативной логики методом наложенных голограмм Фурье на основе нелинейности экспозиционных характеристик голографических регистрирующих сред. Определены требования к свойствам эталонов для детектирования образов, представляющих логическое заключение.

A.V. PAVLOV, N.A. SOLOVEOV
ITMO University, Saint-Petersburg

IMPLEMENTATION OF NON-COMMUTATIVE LOGIC BY THE FOURIER HOLOGRAPHY METHOD: NUMERICAL INVESTIGATION

Implementation of non-commutative logic by the non-linear superimposed Fourier-holograms is considered. The key-point of the method – the logical conclusion from the restored by the hologram field detecting is investigated and confirmed numerically.

Актуальная задача искусственного интеллекта – реализация присущей человеку некоммутативной логики, в которой результат зависит от порядка следования операндов. Один из подходов к задаче основан на формализме математики квантовой механики – описании логического вывода как последовательного проецирования вектора состояния системы на подпространства, в которых представлены независимые операнды [1].

Для реализации идеи последовательного проецирования необходима связь между подпространствами, хранящими независимые образы. В работе [2] теоретически и экспериментально показано, что такая связь может быть реализована за счёт появления разностных частот при записи наложенных голограмм Фурье на регистрирующих средах с квадратичной нелинейностью экспозиционных характеристик (ЭХ ГРС). В докладе рассмотрен ключевой вопрос этого подхода – возможность выделения восстановленного образа из его свёртки с функцией корреляции входного и второго эталона, выводы подтверждены численным моделированием.

Задача рассмотрена для двух ортогональных эталонов A и B, последовательно записанных на наложенных голограммах Фурье с угловым мультиплицированием точечных внеосевых опорных источников.

Вследствие квадратичной нелинейности ЭХ ГРС в среде самостоятельно формируются квадратичные субголограммы. При предъявлении входного образа In, содержащего эталоны A и B, субголограмма H_A даёт отклик

$$A^R(\Delta) \propto A(x) * \left[In(x) \otimes B(x) \right], \quad (1)$$

где * и ⊗ – символы свёртки и корреляции. На рис. 1 показаны поля (1), восстановленные субголограммой при различных V – отношениях длин реализаций эталонов B и A. Эталоны A и B во входном образе In были пространственно разнесены, варьировалась длина образа B. На рис. 2 дана зависимость отношения сигнал/помеха W_A от параметра V при корреляционном детектировании эталона A в восстановленном поле (1).

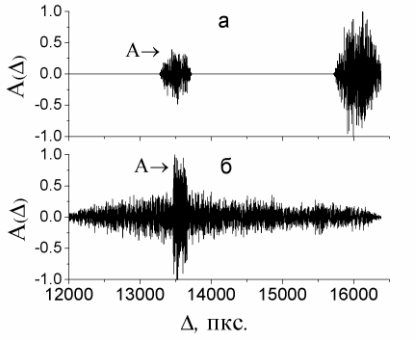


Рис. 1. Отклики квадратичной субголограммы при V = 0.2 (а), V = 8 (б), стрелкой отмечен образ A

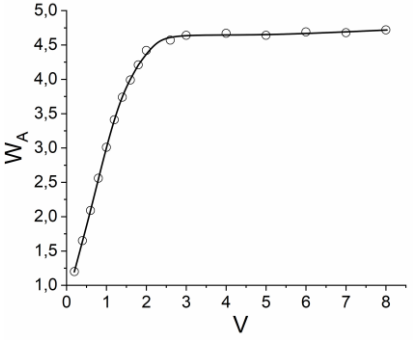


Рис. 2. Зависимость отношения сигнал/помеха от параметра V при детектировании эталона A

Из рис. 1 наглядно видно, что квадратичная субголограмма связывает ранее, то есть при записи голограммы, несвязанные эталоны A и B, а при их восстановлении инвертирует отношение их удельных весов в восстановленном поле относительно отношения как исходного, то есть при записи наложенных голограмм, так и во входном поле In – более слабый образ A выделяется тем сильнее, чем меньше его удельный вес, где выход в насыщение обусловлен ограничением автокорреляцией эталона A (рис. 2). Таким образом, условием реализации методом голографии Фурье некоммутативной логики – модели логического вывода, основанной на последовательном проецировании входного вектора на подпространства, хранящие эталоны, является нелинейность записи эталонов в память системы, то есть нелинейность записи наложенных голограмм.

Список литературы

1. Busemeyer J.R., et al. // Psychological Review. 2011. V. 118 (2). P. 193-218.
2. Pavlov A.V., Orlov V.V. // Quantum Electronics. 2019. V. 49 (3). P. 246-252.

В.Г. ЕФРЕМЦЕВ[1], Н.Г. ЕФРЕМЦЕВ[1], П.Е. ТЕТЕРИН[2],
Е.П. ТЕТЕРИН[3], А.А. БОНДАРЕНКО[4], Е.С. БАЗАВЛУК[5],
А.Н. МОРОЗИХИН[2], И.М. СКОРОБОГАЧ[6]
[1]*Независимый исследователь, Москва*
[2]*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*
[3]*Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева, Владимирская обл.*
[4]*ООО «МИТАК-ЕВРОПА», Москва*
[5]*Лицей «Вторая школа им. В.Ф. Овчинникова», Москва*
[6]*Медицинский центр Major Clinic, Москва*

ИЗМЕНЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И СПЕЦИФИЧНОСТИ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ РАКА ЛЁГКИХ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КОЛИЧЕСТВА КОМПЬЮТЕРНЫХ ТОМОГРАММ ИЗ ДАТАСЕТА LUNA16

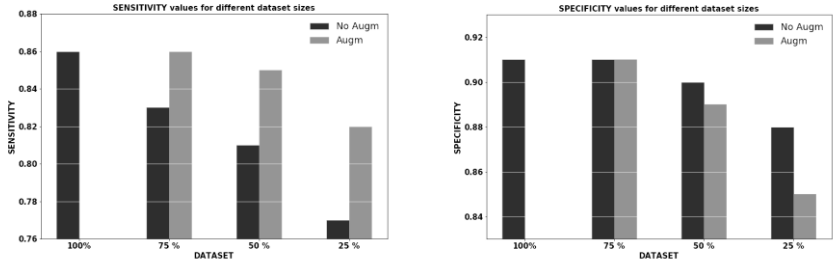
Представлены результаты чувствительности и специфичности метрик классификации при различном количестве компьютерных томограмм рака лёгких, полученных при глубоком обучении нейронных сетей по базе данных LUNA16.

V.G. EFREMTSEV[1], N.G. EFREMTSEV[1], P.E. TETERIN[2],
E.P. TETERIN[3], A.A. BONDARENKO[4], E.S. BAZAVLUK[5],
A.N. MOROZIKHIN[2], I.M. SKOROBOGACH[6]
[1]*Independent researcher, Moscow*
[2]*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)*
[3]*Kovrov State Technological Academy named after V.A. Degtyarev, Vladimir region*
[4]*Mitac Europe Ltd., Moscow*
[5]*Lyceum "Second School" named after V.F. Ovchinnikov, Moscow*
[6]*Major Clinic, Moscow*

CHANGES IN SENSITIVITY AND SPECIFICITY METRICS FOR LUNG CANCER CLASSIFICATION WITH CHANGES IN THE NUMBER OF CT WITH LUNA16 DATASET

The results of sensitivity and specificity of classification metrics for a different number of computed tomograms of lung cancer obtained by deep learning of neural networks using the LUNA16 database are presented.

Исследовались нейронные сети типа ResNet, DenseNet, EfficientNet, ConvNeXt, Visual Transformer на различном количестве компьютерных томограмм (КТ) из открытого датасета LUNA16 [1]. Лучшие результаты были получены для сети DenseNet. Для оценки влияния количества КТ на величины чувствительности и специфичности из датасета LUNA16 были сформированы датасеты, содержащие 75 % КТ относительно исходного датасета, 50 и 25 % КТ соответственно. Изменялся размер датасета, по которому проходило обучение, а тестовый датасет всегда оставался неизменным. Результаты приведены на рис. 1.



а *б*

Рис. 1. Значения чувствительности для различных размеров датасета без аугментации и с аугментацией (*а*); значения специфичности для различных размеров ДС без аугментации и с аугментацией (*б*)

Показано, что значения чувствительности с уменьшением числа КТ в четыре раза уменьшается с величины 0.86 до 0.77 для неаугментированных данных и падает до 0.82 при аугментации. Значения специфичности с величины 0.91 уменьшается до 0.88 в неаугментированной выборке и падает до 0.85 в аугментированной. Интересно отметить, что с уменьшением размера выборки применение аугментации приводит к повышению чувствительности и к понижению специфичности. Этот факт отражает компромисс между чувствительностью и специфичностью [2].

Список литературы

1. https://luna16.grand-challenge.org/Data/.

2. Брюс П., Брюс Э, Гедек П. Практическая статистика для специалистов Data Science. БХВ -Петербург, 2022.

УДК 535(06)+004(06)

С.А. КИРИЙ, Д.А. РЫМОВ, В.Г. РОДИН, П.А. ЧЕРЁМХИН, Р.С. СТАРИКОВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

РЕКОНСТРУКЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ГОЛОГРАММ ОБЪЁМНЫХ СЦЕН МЕТОДОМ ГЕНЕРАТИВНО-СОСТЯЗАТЕЛЬНОЙ НЕЙРОСЕТИ

Для восстановления изображений с голограмм 3D-сцен реализован и предложен метод на основе генеративно-состязательной нейросети, включающей в себя сеть-генератор, который производит восстановление изображений с голограмм, и сеть-дискриминатор, оценивающий качество полученного изображения. Проведена оценка качества восстановленных изображений.

S.A. KIRIY, D.A. RYMOV, V.G. RODIN, P.A. CHEREMKHIN, R.S. STARIKOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

VOLUME SCENE HOLOGRAM RECONSTRUCTION VIA GENERATIVE ADVERSIAL NEURAL NETWORK

A generative-adversarial neural network model, consisting of a generator network, which generates images, and a discriminator network, which assesses their quality, was proposed and trained to reconstruct images from in-line holograms. Quality of reconstructed images was estimated.

Применение нейронных сетей для задач голографии является перспективным направлением [1]. Например, такой подход может позволить избежать появления нежелательных порядков дифракции при восстановлении изображений [2] в силу обучения модели на исходных изображениях объектов, что позволяет выделить из голограммы только требуемую информацию без использования дополнительной фильтрации.

В работе проведено исследование возможности восстановления изображений с голограмм с применением генеративно-состязательной нейросети (ГСН), состоящей из сети-генератора с архитектурой U-Net [3] и сети-дискриминатора. ГСН представляет из себя использование одновременно двух нейронных сетей, одна из которых производит восстановление изображений с голограмм (сеть-генератор), а вторая оценивает качество полученных результатов (сеть-дискриминатор) [4]. Таким образом происходит взаимообучение двух нейросетей, что может

способствовать более тщательному обучению сети-генератора и, как следствие, более высокому качеству восстановлению изображений. На рис. 1 представлены примеры оригинальных изображений и восстановленных при помощи обученной модели с синтезированных и экспериментально зарегистрированных цифровых голограмм. Сравнение сети с моделью на основе U-Net приведено на рис. 2.



а *б* *в* *г*

Рис. 1. Примеры оригиналов объектов (*а*, *в*) и восстановленных изображений с применением генеративно-состязательной нейросети (*б*, *г*)

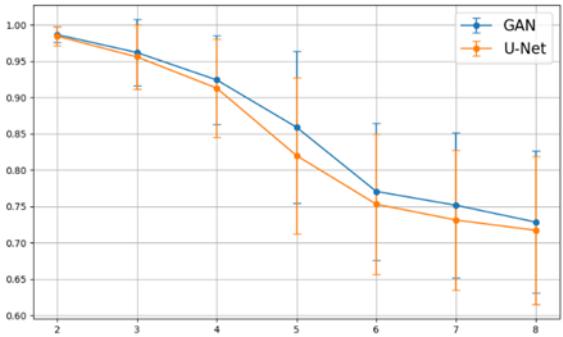


Рис. 2. Значение коэффициента корреляции от числа слоёв сцены

Видно, что как с визуальной точки зрения, так и количественные оценки показывает результативность предложенного метода.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 22-79-10340.

Список литературы

1. Situ G. Deep holography // Light: Advanced Manufacturing. 2022. V. 3. P. 278-300.

2. Svistunov A.S., Rymov D.A., Starikov R.S., Cheremkhin P.A. HoloForkNet: digital hologram reconstruction via multibranch neural network // Applied Sciences. 2023. V. 13. P. 6125-6125.

3. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: convolutional networks for biomedical image segmentation // MICCAI. 2015. V. 9351. P. 234-241.

4. Khan A., Zhijiang Z., Yu Y., et al. GAN-Holo: generative adversarial networks-based generated holography using deep learning // Complexity. 2021. V. 2021. P. 6662161.

УДК 535(06)+004(06)

М.К. ДРОЗДОВ, Д.А. РЫМОВ, А.С. СВИСТУНОВ,
А.В. ШИФРИНА, П.А. ЧЕРЁМХИН, Р.С. СТАРИКОВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ВОССТАНОВЛЕНИЕ БИНАРНЫХ ЦИФРОВЫХ КОНТЕЙНЕРОВ ДАННЫХ С ГОЛОГРАММ НА ОСНОВЕ СВЁРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Для восстановления изображений бинарных цифровых контейнеров данных с голограмм предложен метод реконструкции на основе модификации свёрточной нейронной сети U-Net. Проведено обучение сети на большом количестве сгенерированных данных, а также проведена численная оценка качества восстановления сетью.

M.K. DROZDOV, D.A. RYMOV, A.S. SVISTUNOV, A.V. SHIFRINA,
P.A. CHEREMKHIN, R.S. STARIKOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

RECONSTRUCTION OF BINARY DIGITAL DATA CONTAINERS FROM HOLOGRAMS USING CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK

To reconstruct images of binary digital data containers from Fresnel holograms, a method based on the modified convolutional neural network U-Net is proposed. The network was trained on a large amount of generated data, and a numerical assessment of the quality of network reconstruction was carried out.

Применение нейронных сетей для реконструкции изображений с голограмм позволяет избавиться от проблем, свойственных классическим методам [1], например, восстановить изображение без нежелательных дифракционных порядков, что позволяет отказаться от дополнительной фильтрации изображения [2]. Восстановление 3D-сцен, состоящих из бинарных страниц данных, с голограмм потенциально может дать существенное увеличение количества информации при одном считывании изображения.

В работе проведено исследование возможности восстановления широко используемых бинарных цифровых контейнеров данных – QR-кодов из синтезированных голограмм Френеля при помощи модифицированной свёрточно-развёрточной архитектуры нейронной сети

U-Net. Сгенерирован набор из 50000 QR-кодов и соответствующих им голограмм. На сгенерированном датасете проведено обучение модели. Получено, что величина ошибки по восстановленному изображению составляет 30 %. На рис. 1*а* показано оригинальное изображение QR-кода, а на рис. 1*б* – изображение QR-кода, восстановленное нейросетью после применения бинаризации.



а *б* *в*

Рис. 1. Исходное изображение объекта (*а*), восстановление нейросетью с бинаризацией для начального (*б*) и модернизированного варианта обучения (*в*)

Изображение контейнера слишком неоднородно, поэтому при обучении и тестировании нейросети один отсчёт объекта был увеличен до четырёх отсчётов. В результате величина ошибки восстановления была снижена. Пример восстановленного изображения с использованием модернизированного варианта обучения нейросети показан на рис. 1*в*. Количество ошибок снижено в два раза по сравнению с рис. 1*б*.

В дальнейшем планируется модифицировать архитектуру нейронной сети и провести тестирование на оптически зарегистрированных цифровых голограммах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 23-12-00336.

Список литературы

1. Zeng T., Zhu Y., Lam E.Y. Deep learning for digital holography: a review // Optics Express. 2021. V. 29. No. 24. P. 40572-40593.

2. Рымов Д.А, Черёмхин П.А, Стариков Р.С. Нейросетевая реконструкция сцен с цифровых голограмм на основе извлечения амплитуды и фазы // Оптический журнал. 2022. № 9 (89). С. 9-11.

УДК 535(06)+004(06)

Н.А. КУЗЬМИН, Ю.Д. АРАПОВ
Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, Москва

СПОСОБ СНИЖЕНИЯ ШУМОВОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НА ВОССТАНОВЛЕННЫХ ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММАХ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Предложена архитектура нейронной сети, позволяющая выполнять классификацию пикселей на изображениях по двум классам: частицы и фон. Предложен подход к аугментации изображений в базе данных для расширения возможностей нейронной сети при распознавании микрочастиц на послойно восстановленных голограммах. Реализована классификация частиц с помощью классических алгоритмов поиска связных пикселей. Улучшены точности распознавания и определения координат центров микрочастиц.

N.A. KUZMIN, Yu.D. ARAPOV
N.L. Dukhov All-Russian Scientific Research Institute of Automatics, Moscow

THE METHOD FOR REDUCING THE NOISE COMPONENT ON RECONSRTUCTED DIGITAL HOLOGRAMS USING THE NEURAL NETWORK

The neural network architecture has been proposed that makes it possible to classify pixels in images between two classes: particles and background. An approach has been proposed to augment images in a database to expand the capabilities of the neural network when recognizing microparticles in layer-by-layer reconstructed holograms. Particles classification has been implemented using classical searching connected pixels algorithms. Improved recognition accuracy and determination of microparticles centers coordinates.

Определение параметров распределения микрочастиц в аэрозолях представляет особый интерес для многих научных сфер, таких как газодинамика, медицина, экология, астрофизика. Причём голографический метод регистрации имеет ряд преимуществ среди своих конкурентов [1]. Длительное время ручной обработки экспериментальных голограмм затрудняет продвижение науки в данном направлении. Для автоматизации процесса обработки данных было предложено использование нейронной сети [2], однако прошлая версия имела существенный недостаток: малый объём базы данных, который приводил

к неточностям работы нейронной сети с различными значениями яркости и контраста на тестовых изображениях.

Нейронная сеть с архитектурой U-net была обучена на синтетических данных, полученных при моделировании голографической регистрации в программе Fresnel [3]. В расчётных экспериментах был получен ряд голограмм, проведено их послойное восстановление и выполнена сегментация по двум классам – частицы и фон. Аугментация данных выполнялась алгоритмом, реализованном на языке программирования Python, который случайным образом изменял контраст и яркость на каждом изображении в базе.

База данных состоит из 221184 изображений размером 128×128 пикселей, полученных из восстановленных слоёв, часть одного из них приведена на рис. 1. На рис. 2 показан пример использования алгоритма для случайного изменения контраста и яркости. Пример использования нейронной сети на модельных данных приведён на рис. 3. Подобная нейронная сеть позволяет избавиться от шумовой составляющей и применить классические алгоритмы поиска связных пикселей и определения координат центров частиц без потери исходной информации. Точность распознавания на экспериментальных данных достигла 85 %.

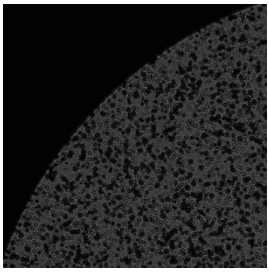


Рис. 1. Часть исходного изображения

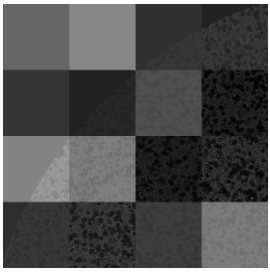


Рис. 2. Результат работы случайного изменения контраста и яркости

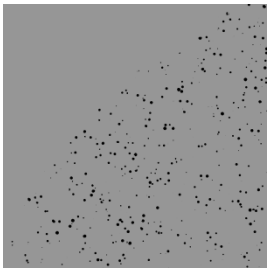


Рис. 3. Результат работы нейронной сети

Список литературы

1. Arapov Yu.D., Dvornichenko M. E., et. al. Three-wave holography of polydispersed aerosol // Optical Engineering. 2020. V. 59 (10). P. 102420.

2. Кузьмин Н.А., Арапов Ю.Д. Детектирование микрочастиц на восстановленных голографических изображениях объёмной среды с помощью нейронных сетей // Автометрия. 2023. Т. 59. № 3. С. 86-92.

3. Serov R., Malyutin A., et. al. // Fresnel. www.wavesimsoft.ru.

УДК 535(06)+004(06)

А.А. ВОЛКОВ, Д.С. КАЗАКОВ, А.Д. МЕЛЕШКО,
Т.З. МИНИХАНОВ, А.С. СВИСТУНОВ, А.В. ШИФРИНА,
Е.К. ПЕТРОВА, Е.Ю. ЗЛОКАЗОВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ МОДУЛЯЦИИ ФАЗЫ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО МОДУЛЯТОРА СВЕТА

Для создания оптических дифракционных нейронных сетей исследован отклик фазового жидкокристаллического (ЖК) пространственно-временного модулятора света (ПВМС) Santec SLM-200. Использовались бинарные фокусирующие фазовые дифракционные оптические элементы.

A.A. VOLKOV, D.S. KAZAKOV, A.D. MELESHKO,
T.Z. MINIKHANOV, A.S. SVISTUNOV, A.V. SHIFRINA,
E.K. PETROVA, E.Yu. ZLOKAZOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

MEASUREMENT OF THE PHASE MODULATION DYNAMICS OF THE LIQUID CRYSTAL SPATIAL LIGHT MODULATOR

To create optical diffraction neural networks, the response of a Santec SLM-200 phase liquid crystal spatial light modulator was investigated. Binary focusing phase diffraction optical elements were used.

Искусственные нейронные сети представляют собой отличный инструмент для обработки больших объёмов данных. Однако же из-за нарушения эмпирических законов Мура и масштабирования Деннарда, дальнейший рост производительности искусственных нейросетей на основе компьютеров с архитектурой фон Неймана значительно затруднён и даётся с исключительно высоким ростом энергопотребления [1]. Решением проблемы вычислительной мощности может быть использование иных методов обработки информации, например, оптических. Такой подход позволяет использовать все преимущества оптических методов обработки информации, включая высокое быстродействие оптоэлектронных компонентов и хорошую энергоэффективность. Одной из возможных реализаций оптической искусственной нейронной сети является архитектура дифракционной

нейронной сети с использованием пространственно-временных модуляторов света для вывода дифракционных оптических элементов. Общая же производительность дифракционной нейросети ограничена фактическим быстродействием модуляторов света [2].

В работе исследовалось фактическое быстродействие жидкокристаллического пространственно-временного модулятора света Santec SLM-200. Установка для проведения эксперимента представлена на рис. 1. Использовался лазер Cobolt Samba 200 мощностью 5 мВт, цифровая камера Vieworks Flare 48MP, работающая с размером области интереса 400 × 128 пикселов при частоте обновления кадров 1 кГц. На исследуемый модулятор с частотой 2 Гц выводились бинарные внеосевые дифракционные оптические элементы, фокусирующие световой поток в пятно малого размера на фотокамере. Модели синтезировались с использованием итерационного метода поиска со случайной траекторией для сферически расходящегося считывающего пучка. Пример изображения, снятого с фотокамеры, приведён на рис. 2.

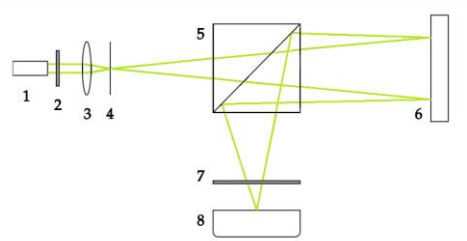


Рис. 1. Установка: *1* – лазер; *2* – ослабляющий фильтр; *3* – собирающая линза; *4* – апертура; *5* – светоделительный куб; *6* – модулятор; *7* – поляризатор, *8* – камера



Рис. 2. Пример изображения с фотокамеры

Получено, что время нарастания переднего фронта составило 125 ± 3 мс, а время спада заднего фронта – 61,9 ± 0,9 мс.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 23-12-00336.

Список литературы

1. Xu R., Lv P., Xu F., Shi Y. A survey of approaches for implementing optical neural networks // Optics & Laser Technology. 2021. V. 136. P. 106787.

2. Миниханов Т.З. Злоказов Е.Ю., Стариков Р.С. Черёмхин П.А. Временная динамика модуляции фазы жидкокристаллического пространственно-временного модулятора света // Измерительная техника. 2023. № 12. С. 35-39.

УДК 535(06)+004(06)

Н.В. НИКИТИН, А.В. КОЗЛОВ, П.А. ЧЕРЁМХИН, В.Г. РОДИН
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЙ В ФУРЬЕ-ПТИХОГРАФИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЕНСАЦИИ ТЕМНОВЫХ ШУМОВ ЦИФРОВЫХ КАМЕР

Для восстановления изображения методом фурье-птихографии требуется набор снимков, полученных при освещении объекта под различными углами. Приведены результаты сравнения методов компенсации шумов камер для повышения качества восстановленных изображений.

N.V. NIKITIN, A.V. KOZLOV, P.A. CHEREMKHIN, V.G. RODIN
National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

IMAGE QUALITY IMPROVEMENT BY CAMERA DARK NOISE COMPENSATION IN FOURIER PTYCHOGRAPHY

To reconstruct images using the Fourier ptychography, a set of frames with different object illumination are registered. Camera noise compensation methods for improving the quality of reconstructed images are compared.

Фурье-птихография позволяет восстанавливать высокочастотные компоненты фурье-спектра объекта. Для этого регистрируются изображения объекта, освещённого под различными углами [1]. Такая регистрация даёт некоторое число световых снимков, а также большое количество темновых снимков, характеризующихся низким отношением сигнал/шум, что может оказывать существенное негативное влияние на качество восстановленного изображения [2].

Один из вариантов снижения влияния низкого качества темновых кадров – учёт уровня чёрного цифровой камеры. Для определения уровня чёрного необходимо найти среднее значение сигнала для кадров, полученных при съёмке в отсутствии источников излучения [3]. После вычитания уровня чёрного появляются пиксели с отрицательными значениями сигнала: их значения приравниваются к нулю, что приводит к снижению информационного содержания кадров. В качестве альтернативы можно использовать вычитание минимального значения в пикселе по всему изображению. В этом случае не происходит уменьшения информационного содержания кадров, но для компенсации шума камеры используется значение, которое не получено статистическим путём.

В работе проведено экспериментальное исследование улучшения качества реконструкции изображений в фурье-птихографии при использовании методов компенсации темновых шумов камер. Регистрация наборов изображений проводилась с использованием светодиодной матрицы (расстояние между светодиодами 2.1 мм), микрообъектива (NA = 0,11), камеры Retiga R6 и микроконтроллера Raspberry Pi. В качестве объекта была использована мира. На рис. 1 представлены увеличенные фрагменты восстановленных изображений, полученных методом фурье-птихографии без использования компенсации шумов (*а*, *г*), с вычетом уровня чёрного (*б*, *д*), с вычетом минимального значения (*в*, *е*) для времён экспозиций 50 мс и 500 мс соответственно.

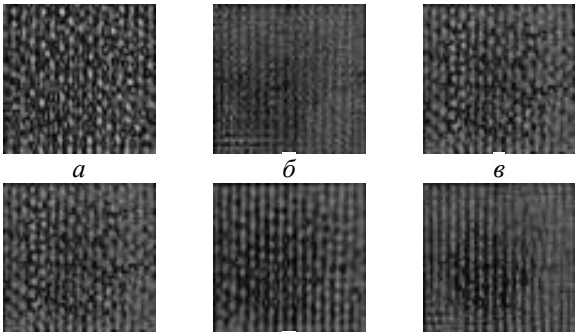


Рис. 1. Фрагменты восстановленных изображений, полученных методом фурье-птихографии, без использования компенсации шумов (*а*, *г*), с вычетом уровня чёрного (*б*, *д*), с вычетом минимального значения (*в*, *е*) для времён экспозиции 50 мс и 500 мс соответственно

Видно, что без компенсации объект уступает по качеству полученным с компенсацией шумов. Вычет минимального значения позволяет получить большую резкость, чем при вычете уровня чёрного, однако приводит к появлению артефактов на изображении.

Список литературы

1. Konda P.C., Loetgering L., Zhou K.C., Xu S., Harvey A.R., Horstmeyer R. Fourier ptychography: current applications and future promises // Opt. Express. 2020. V. 28. P. 9603-9630.

2. Никитин Н.В., Козлов А.В., Черёмхин П.А., Евтихиев Н.Н. Оценка влияния шумов цифровых камер на качество реконструкции изображений в птихографии // Сборник трудов XII Межд. конф. по фотонике и информационной оптике. М.: НИЯУ МИФИ, 2023. С. 641-642.

3. Claveau R., Manescu P., Fernandez-Reyes D., Shaw M. Structure-dependent amplification for denoising and background correction in Fourier ptychographic microscopy // Opt. Express. 2020. V. 28. P. 35438-35453.

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

-А-

Абеуов Д.Р. 279
Абрамочкин Е.Г. 111
Аверин С.В. 223
Авершин А.А. 201
Авласевич Н.Т. 597, 627
Агапов Д.П. 39
Агуило М. 511, 517
Аймуханов А.К. 273, 279, 287, 291
Айт А.О. 289, 293
Акст В.М. 33
Алексеенко Н.А. 377, 379, 397, 399
Алеферкина К.Е. 125
Алехин М.С. 409
Алымкулов С.А. 635
Анисимова С.А. 373
Анпилов В.С. 197
Антонов Е.А. 473
Аракелян С.М. 147
Арапов Ю.Д. 649
Арсенин А.В. 237
Арцер И.Р. 497
Асташкевич С.А. 339, 341
Афанасьева А.В. 67
Афанасьева О.Л. 637
Афонин Г.В. 53
Ахматханов А.Р. 35, 479
Ахмеров А.Х. 199
Ашарчук Н.М. 383, 393, 395
Ашихмин Д.И. 103

-Б-

Бабич Н.С. 313
Бабкина А.Н. 301, 309
Баева А.В. 549
Бажутова И.В. 418
Базавлук Е.С. 643
Бакланова К.Д. 47
Бакунов М.И. 55, 129
Балан Н.Н. 587
Балбекин Н.С. 243
Баранов К.Н. 541
Баташова С.С. 573
Бахус А.В. 465
Башмакова Е.Н. 119
Безруков П.А. 297
Безус Е.А. 225
Безус Ю.А. 79, 529
Бейсембеков М.К. 295
Белашов А.В. 233, 411, 601, 613
Белашов М.В. 613
Белов К.Н. 227
Белокур А.А. 137
Белоусов Д.А. 149
Бельская Д.Е. 479
Бельтюкова Д.М. 411, 601
Беляева Т.Н. 233, 411
Беляков В.В. 595
Берик А.А. 295
Бехтин Ю.С. 265
Бикбаев Р.Г. 109, 425
Биленко И.А. 95, 97, 123, 139
Битяев Е.П. 39
Блоцкая Д.С. 617
Бобрева Л.А. 483, 487
Бобров И.Б. 31
Бобровский А.Ю. 49
Богачков И.В. 441, 447, 449, 451, 453, 455, 459
Богдан Е.В. 357
Богуславская-Гапешина А.А. 535, 537
Бодров С.Б. 55
Бойко А.А. 35
Боканова А.А. 295
Болдырев К.Н. 59, 235, 239, 509, 515, 523
Болотов Д.В. 443
Большаков А.П. 523
Бондаренко А.А. 643
Бондаренко А.Г. 315
Боритко С.В. 221
Бородако К.А. 389
Бородин Ю.П. 245
Бородина Л.Н. 63, 151, 163
Бражников М.К. 591

Брауд А. 511, 517
Брецько М.В. 535, 537
Бугай А.Н. 531
Буднев А.Ю. 207, 211, 559
Букин В.В. 422
Булыга Д.В. 307
Бурданова М.Г. 251
Буримов Н.И. 43, 479
Бурков А.С. 155
Бурцев А.А. 89
Бусурин В.И. 565
Бутов О.В. 165
Буторин П.С. 601, 613
Буть А.И. 593
Бухаров Д.Н. 147
Бухенский К.В. 131
Быков А.А. 281
Быков Д.А. 225
Быковский А.Ю. 241

-В-

Вагов А.В. 33
Валова Т.М. 289
Варжель С.В. 177, 183
Вартанян Т.А. 67, 315
Васецкий С.О. 595
Васильев С.В. 229
Васильева О.Ф. 335
Василюк Г.Т. 289, 293
Васин А.А. 587
Васютинский О.С. 233, 411, 601, 613
Вашукевич Е.А. 119, 543, 549
Ведерникова А.А. 63
Векшин М.М. 439
Вениаминов А.В. 151, 163
Венидиктова О.В. 289
Вергулес А.И. 29
Веселова В.О. 275
Ветшев Ф.П. 143
Витухновский А.Г. 99
Владимиров А.П. 259
Власов М.Ю. 409, 413
Власов С.В. 181
Вознесенская А.О. 557
Войтешонок Ю.В. 407
Войцеховский А.В. 285
Волков А.А. 651
Волков В.Г. 579, 585
Волков В.С. 237
Волкова В.В. 337
Волова Л.Т. 403, 418
Володин В.Д. 275
Волчков С.С. 161
Волынский М.А. 261
Волынцев А.Б. 203, 485
Вольхин И.Л. 445
Воробьев А.К. 95, 97
Воропай Е.С. 377, 379, 397, 399
Восканян Г.Р. 179
Вохник О.М. 205
Высланко И.С. 115

-Г-

Гавриловец Д.А. 347
Гавриш С.В. 351
Гаврушко В.В. 269
Газизов А.Р. 77
Галуцкий В.В. 475
Ганго С.Е. 283
Ганжерли Н.М. 247, 625
Гарбузов К.Н. 29
Гаркушин А.А. 445
Гармаева Э.В. 457
Гарматина А.А. 393
Гарнов С.В. 422
Гасин А.С. 173
Гататдинов А.Р. 371, 521
Гейвандов А.Р. 37
Гиндин П.Д. 579, 585
Гладских И.А. 187
Глебович Т.С. 289
Голант К.М. 173
Головастиков Н.В. 225
Голощапов М.Ю. 31
Голубева Т.Ю. 119
Горбунов А.С. 143
Горелик А.М. 293
Горенский Ф.А. 93
Горлач М.А. 541
Горлов Н.И. 189, 441
Горн Д.И. 285
Горяев М.А. 271
Грачёв Я.В. 113
Грезев Н.В. 91
Грициенко А.В. 179
Грищенко И.В. 51
Громов И.В. 605
Губин М.Ю. 237

Гуляев С.Н. 247
Гурылева А.В. 573
Гурьев Д.А. 431
Гусельников М.С. 491

-Д-

Давиденко Н.К. 49
Давыдовская В.В. 505
Дададжанов Д.Р. 67, 73, 315
Даденков И.Г. 41
Данилов В.А. 539
Дворецкий С.А. 285
Демидов А.С. 581
Демидов В.В. 277, 307
Демин В.А. 435
Демушкин Д.Ю. 51
Денисов А.Н. 171
Денисов Д.А. 51
Денисов Д.Г. 207, 213, 555
Дербуш Д.А. 229
Джаманкызов Н.К. 631, 635
Дзедолик И.В. 545
Дзядух С.М. 285
Диаб М.О. 59, 515
Диас Ф. 511, 517
Диденко Я.С. 511, 517
Дмитриев А.А. 183
Дмитриев В.К. 201
Дмитриев Н.Ю. 97
Долганов В.К. 47
Долганов П.В. 47
Долгирев В.О. 629
Долгополов А.Д. 309
Долматов Т.В. 422
Досколович Л.Л. 225, 249
Доценко А.А. 87
Драчев В.П. 29
Дроздов М.К. 647
Дубиков А.В. 479
Дубынин С.Е. 37, 245
Дудкина Т.Д. 275
Дукельский К.В. 307
Дьяченко А.А. 611
Дю В.Г. 503
Дюбуа А.Б. 131

-Е-

Евентьева Е.В. 143
Евстропьев С.К. 83, 307
Евтихиев Н.Н. 91
Егоров А.Н. 385
Егорова К.А. 507
Егорова К.А. 93
Егорченков Н.А. 575
Егорышева А.В. 275
Ежова К.В. 607
Езерский А.С. 251, 615
Елец Д.И. 137
Елисеев Н.Н. 89
Елманов А.В. 265
Емельянов П.Н. 599
Епифанов Е.О. 75, 401
Ермолаев Г.А. 115
Ерохин К.Ю. 465
Есин А.А. 35
Ефремов А.Г. 405
Ефремцев В.Г. 643
Ефремцев Н.Г. 643

-Ж-

Жақанова А.М. 287
Жевняк И.С. 353
Жеглов М.А. 595
Железнов В.Ю. 53, 57, 133
Живаго Е.Р. 319
Жигулина И.В. 229
Жигунов Д.М. 29
Жихорева А.А. 233, 411, 601, 613
Жмурова Д.Б. 595
Жуков С.С. 525
Жукова Е.С. 237
Жукович-Гордеева А.А. 45
Жуковский Д.Д. 469
Журавлев В.А. 485
Жучкова Д.В. 401

-З-

Забалуева З.А. 185
Забелин А.В. 599
Завгородний Д.С. 217
Загорулько К.А. 371
Загравский А.К. 49
Зажогин А.П. 355, 359, 377, 379, 397, 399
Зайкин В.Д. 581
Зайцев К.И. 159
Замятин А.А. 175
Земцов Д.С. 29
Земцова А.К. 29

Зимина Ю.И. 511, 517
Зимняков Д.А. 161
Зинин П.В. 281
Зият А.З. 291
Злоказов Е.Ю. 255, 651
Зо Л.Х. 565
Золотухина А.А. 573
Зотов А.И. 147
Зотов А.М. 205
Зотова А.В. 418
Зубарева С.Р. 420
Зыкина А.А. 187
Зырянова К.С. 301, 309
Зюбин А.Ю. 71, 420

-И-

Ибрагимова Э.И. 257
Ивакин С.В. 57, 133
Иванов А.А. 381
Иванов А.В. 181
Иванов А.Д. 181
Иванов А.М. 507
Иванов В.В. 587
Иванов П.А. 253
Иванов С.И. 563
Иванов С.С. 403
Иванова А.А. 567
Иванова А.И. 57, 133, 507
Иванова Т.В. 217
Избасарова Э.А. 77
Ильюшина Д.А. 247
Ионин В.В. 89
Исамов А.Н. 207, 211, 559
Исмагилов А.О. 497
Исманов Ю.Х. 631, 635, 639
Исхакова Л.И. 511
Итяксов Ю.Д. 413

-К-

Кабдиева А.У. 287
Кабисов А.М. 329
Кадетова А.В. 481, 495
Кадриев О.Р. 269
Казаков Д.С. 651
Казанцев С.Ю. 443, 465, 469
Казарян Д.А. 237
Калачев Ю.Л. 169
Калугин А.И. 473
Калязина Д.В. 183
Ками П. 511, 517
Камынин В.А. 169
Каплунов И.А. 57, 133, 507
Капридов Н.А. 95, 139
Каргин Ю.Ф. 503
Карпач П.В. 289, 293
Карцев П.Ф. 331
Карпов В.В. 579, 585
Катаев Д.М. 91
Катеев И.Ю. 127
Катыба Г.М. 251
Кашапов А.И. 225
Кашина Р.Р. 277
Киреев С.Г. 351
Кирий С.А. 645
Киртаев Р.В. 237
Киселев А.В. 89
Кислов Д.А. 313
Кистенева М.Г. 503
Кленова Н.А. 409
Клычков А.М. 417
Кобцев С.М. 605
Ковалев М.С. 255
Коваленко А.Ф. 391
Коваленко М.Н. 377, 379, 397, 399
Коваленко Н.В. 197
Козлов А.А. 203, 485
Козлов А.В. 263, 371, 653
Козлов С.А. 491, 497
Козлова А.И. 183
Козьмина П.В. 605
Колесников О.В. 443
Колымагин Д.А. 99
Комисаров В.А. 177, 183
Кон И.И. 71
Конеев Р.В. 323, 345
Конов Ю.В. 425
Кононов Д.В. 67, 73, 315
Коноплев Г.А. 415
Конюхов А.Н. 131
Коняшкин А.В. 51
Копёнкин С.С. 37, 245
Копылов С.В. 333
Корнеева А.А. 281
Корнилин Д.А. 435
Корнилицын А.Р. 527
Корнилова Е.С. 233, 411
Коробков К.А. 565
Коробков М.А. 581

Коробкова У.Р. 177
Коровай О.В. 325
Короленко П.В. 205
Корольков В.П. 149
Короннов А.А. 65, 209
Корсаков В. 415
Корчагина А.В. 185
Коршунов А.А. 393, 395
Косолапова К.Д. 437
Косолобов С.С. 29
Кострицкий С.М. 477
Костромыкина В.В. 424
Кострюкова Я.С. 353
Котликов Е.Н. 589
Котов В.М. 223
Котова А.Д. 347
Котова С.П. 141, 153
Кохановский А.Ю. 605
Кочаков А.В. 67, 73
Красников Д.В. 251
Краснов В.В. 267
Кривецкая А.А. 143
Криштоп В.В. 203, 445, 485
Кроитору М.Д. 33
Круглов С.К. 593
Кубанов Р.Т. 205
Кудрявцев А.А. 339
Кузнецов А.А. 609
Кузнецов А.В. 45
Кузнецов А.И. 415
Кузнецов А.С. 569
Кузнецов И.О. 331
Кузнецов П.И. 145
Кузнецов С.А. 579, 585
Кузнецова К.Р. 549
Кузьменко Н.К. 301
Кузьменок Д.А. 31
Кузьмин М.С. 561
Кузьмин Н.А. 649
Кузьмин Н.Н. 509
Кулагина М.А. 343
Кулак Г.В. 617, 621, 623
Кулешова К.В. 511, 517
Кундалевич А.А. 420
Кундикова Н.Д. 227
Кунева М. 527
Курников М.А. 55
Курочкин Н.С. 179
Кустов Д.М. 143
Куц Р.И. 149
Кучеренко М.Г. 311, 317
Кучерявый С.И. 131

-Л-

Лавров А.П. 563
Лавровская Н.П. 589
Лаврухин Д.В. 159
Ларионов И.А. 155
Ларкин И.А. 33
Ласткин В.А. 269
Левкин В.В. 143
Левковская В.М. 117
Левусь М.В. 105
Лемба И.Н. 413
Леонидова А.А. 427
Леонтьев А.П. 87
Летова Е.Ю. 217
Лиокумович Л.Б. 467
Липатов Д.С. 165
Лис Д.А. 511, 517
Литвин А.П. 63
Литвинов И.К. 233, 411
Лобанов А.И. 169
Лойко П.А. 511, 517
Ломов Е.В. 31
Лосевский Н.Н. 141, 153
Лосин А.Л. 309
Лотин А.А. 89
Лунёв А.Ю. 303, 305
Лупин А.В. 583
Лушников Д.С. 637
Лыфарь Н.С. 415
Львовский А.И. 139
Ляликов А.М. 593, 597, 627
Лялин Д.О. 415
Лямин А.В. 418
Ляхомская К.Д. 429

-М-

Маврешко Е.И. 361, 363, 365, 367
Маврицкий О.Б. 385
Магницкий Н.Д. 167
Магницкий С.А. 39
Майорова А.М. 141
Макаева Р.Х. 567
Макин В.С. 85, 375
Макин Р.С. 85, 375
Маковецкая Т.А. 193

Маковецкий А.А. 175
Максимов Д.В. 535, 537
Максимова Л.А. 603
Малинский Т.В. 53, 57, 133
Малышев А.И. 149
Малышев И.В. 181
Малышев О.К. 81
Мальцев В.В. 509
Мамаева К.А. 422
Мамян К.А. 101
Манучаров Д.Р. 259
Марасанов Д.В. 299, 427
Маргарян И.В. 63
Мардини А.А. 65
Мареев Е.И. 383, 393, 395
Мариничева К.А. 507
Маркварт А.А. 467
Маркин В.В. 637
Марков Д.А. 325
Маркова Л.В. 399
Мартынов И.Л. 81, 107
Масалов А.В. 123, 139
Маскевич А.А. 289
Маскевич С.А. 289, 293
Маслов А.В. 129
Матеос Х. 511, 517
Маурер И.А. 247
Махсудов Б.И. 471
Мачихин А.С. 219, 573
Медведев О.С. 137
Медников С.В. 525
Мелешко А.Д. 651
Мельник М.В. 491, 497
Микляева Е.П. 509
Миксюк Ю.И. 41
Миленкович Т. 65
Минаев В.П. 401
Минаев Н.В. 75, 103, 135, 387, 393, 395, 401
Минаев С.Е. 103, 401
Минаева Е.Д. 135
Минибаев А.И. 321
Миниханов Т.З. 255, 651
Миньков К.Н. 139
Мирущенко М.Д. 437
Митусова А.А. 73
Михайлов Н.Н. 285
Михалевский В.А. 89
Михарев Е.А. 303, 305
Могильный В.В. 633
Можаева М.Д. 393, 395
Мололкин А.А. 527
Молчанова А.Д. 515
Мольков Т.С. 107
Морозихин А.Н. 643
Морозов Д.В. 95, 97
Моршнев С.К. 195
Москалев Д.Н. 203, 485
Муратов Д.А. 69
Мурашкин В.В. 503
Мурзаков М.А. 91
Мурзина Т.В. 49, 87
Мусабек Н.К. 291
Мусабекова Э.К. 287, 291
Мушин Ф.Ю. 317
Мясников Д.В. 155, 167

-Н-

Набилкова А.О. 491, 497
Навныко В.Н. 617, 621, 623
Наговицын К.М. 283
Нади А. 511, 517
Надолинский А.М. 323, 345
Надькин Л.Ю. 325
Налбандян В.М. 311
Напольский К.С. 87
Нащекин А.В. 297
Невзоров А.А. 89
Нежевенко С.С. 607
Никитин Н.В. 653
Николаев Н.Э. 69, 431
Николаева И.Н. 424
Николаенко Т.В. 621, 623
Никоноров Н.В. 277, 297, 299, 427
Нифонтова Е.В. 445
Новиков В.Б. 49, 87
Новиков С.М. 237

-О-

Обронов И.В. 155
Овчаренко Б.Д. 169
Овчинников А.С. 267
Опарин Е.Н. 491
Орехова Н.А. 355, 359
Осминин С.В. 143
Отрохов С.Ю. 433

-П-

Павленко Д.В. 571
Павлов А.В. 231, 641
Павлов В.И. 519, 521
Павлов И.Н. 257, 575
Павлов Н.Н. 205
Павлов П.В. 259
Павлов С.К. 511
Палатников М.Н. 481, 483, 487, 493, 495, 501
Палехова А.В. 67, 315
Панкратов А.Л. 587
Панькова С.В. 283
Парфенов В.А. 215
Паршин В.Д. 143
Патапович М.П. 349, 353, 357
Патолятов А.Д. 99
Перевощиков Д.А. 473
Пермякова И.Е. 381
Песняков В.В. 297, 299
Петрачков Д.Н. 211
Петров В. 517
Петров Н.В. 113, 243, 251, 615
Петров Н.И. 533, 539
Петрова Е.К. 571, 651
Петрова С.В. 495
Печенкин А.А. 385
Печенкин Н.С. 201
Пикулев В.Б. 493
Пикуль О.Ю. 501
Писарева Е.В. 409, 413
Пискунова Е.Р. 569
Плеханов А.А. 107, 319
Плёнкин А.П. 191
Плясцов С.А. 187
Пожар В.Э. 219
Пожидаев Е.П. 45
Полетаев Д.А. 553
Полторабатько Д.А. 71
Поляков А.В. 463
Пономарев Д.С. 159
Пономарев Р.С. 435
Попов В.В. 101, 539
Попов В.С. 65, 209
Попов М.В. 181
Попов С.М. 165, 175
Попова М.Н. 59, 515
Портнова К.А. 83
Порфирьев А.П. 249
Потапенко А.О. 351
Пржиялковский Я.В. 195
Привалов В.Е. 369
Прокопова Д.В. 111
Прокуратов Д.С. 427
Проскурин С.Г. 577
Просовский О.Ф. 207, 211, 559
Просовский Ю.О. 207, 211, 559
Прохоренков Н.О. 261
Прохоров А.В. 237
Прусский А.И. 481
Пудовкин М.С. 77
Пустовалов А.В. 431
Путилин А.Н. 37, 245
Путилин Н.А. 37, 245
Пухтеев А.О. 355, 359
Пушкарев Д.В. 105
Пую П.В. 167
Пчелкина Н.В. 461, 469
Пшеничнюк И.А. 29
Пыхтин Д.А. 425
Пятышев А.Ю. 483

-Р-

Рабенандрасана Ж. 461
Рабош Е.В. 243
Равин А.Р. 431
Рагинов Н.И. 251
Радивон А.В. 251
Раднатаров Д.А. 605
Раздобарин А.Г. 137
Раков И.И. 251
Ракунов П.А. 507
Ральченко В.Г. 523
Расихина П.Д. 347
Расковская И.Л. 575
Растрыгин Д.С. 619
Решетова М.В. 387
Ризаев Г.Э. 105
Ровенко В.В. 393, 395
Рогалин В.Е. 53, 57, 133
Рогов С.А. 561
Рогожников Г.С. 405, 417, 424
Родин В.Г. 645, 653
Рожкова К.С. 279
Розанов А. 31
Розанов К.А. 93
Розенталь С.Р. 313
Романов С.А. 422

Руди П.А. 405
Рудый А.В. 361, 363, 365, 367
Румянцев В.В. 79, 529
Рыбалка А.Е. 79, 529
Рыбалтовский А.А. 165
Рыбалтовский А.О. 75
Рымов Д.А. 263, 267, 645, 647
Рябов Н.А. 403
Рябухо В.П. 603, 611
Рябушкин О.А. 51, 197
Ряховский Д.В. 165. 175

-С-

Савельев М.В. 125
Савельева Т.А. 143
Савченков Е.Н. 479
Сагателян Г.Р. 569
Саечников К.А. 41
Сазонов А.И. 195
Сазонов С.В. 157
Салгаева У.О. 203, 485
Салова А.В. 233, 411
Саметов А.Р. 149
Самусев И.Г. 71, 420
Санджиева М.А. 437
Сапцова О.А. 209
Саратовский А.С. 299
Саргсян А.С. 215
Сафошкин А.С. 131
Свистунов А.С. 263, 647, 651
Сгибнев Е.М. 299
Севостьянов О.Г. 477
Седов В.С. 523
Седов Н.С. 467
Седова Ю.К. 103, 401
Сейсембекова Т.Е. 273
Сектаров Э.С. 523
Селезнев Л.В. 105
Семенов А.А. 233, 601
Семенова И.В. 233, 411, 601, 613
Семенова Л.Е. 513
Семёнов С.Л. 171
Сергеев А.А. 57, 133
Сергеев М.М. 309
Серебренников К.В. 605
Сидоров А.И. 297, 303, 305
Сидоров Г.Ю. 285
Сидоров Н.В. 483, 487, 493, 501
Сидорова А.Д. 93
Сидорова М.Н. 115
Симдянкин И.В. 37
Симонян Р.А. 43
Сингх Р. 547
Синев Д.А. 93
Сироткин А.А. 169
Ситников Н.Н. 389
Скоробогач И.М. 643
Смирнов А.С. 29
Смирнов М.В. 487, 493
Смирнова Е.В. 137
Сможный А.М. 173
Смольянинов В.А. 207, 211, 559
Снигирев Л.А. 137
Соколенко Б.В. 553
Соколов Ю.М. 539
Соле Р.М. 511, 517
Соловьев В.Г. 283
Соловьев Н.А. 641
Соломашенко А.Б. 569, 637
Сомов А.А. 599
Сосунов А.В. 527
Сотничук С.В. 49
Сошников Д.В. 249
Спектор И.Е. 159
Стариков Р.С. 263, 267, 571, 645, 647
Старостин Н.И. 195
Степанова О.В. 415
Степанова О.С. 415
Сторожев С.А. 445
Стоякин В.В. 539
Страупе С.С. 31
Стручалин Г.И. 31
Стукачев С.Е. 57, 133
Субботин К.А. 511, 517
Судас Д.П. 145, 173
Суханов А.Е. 475
Сцепуро Н.Г. 255
Сысолятин С.П. 401
Сычева С.Д. 199

-Т-

Тажибаев С.К. 295
Тазиев К.Р. 29
Таланов Д.А. 189
Талеронок Ю.В. 353
Тараканов Е.Д. 361, 363, 365, 367
Татмышевский М.К. 237
Телешевский В.И. 599

Теплякова Н.А. 487, 495, 501
Теретёнков А.Е. 547
Терещенко Г.В. 589
Терещенко Н.В. 155
Терло Я.В. 557
Тетерин Е.П. 373, 643
Тетерин П.Е. 643
Тимофеев И.В. 109, 425
Тимченко Е.В. 403, 409, 413, 418
Тимченко П.Е. 403, 409, 413, 418
Титов А.И. 511, 517
Титов Р.А. 487
Титова Е.И. 237
Токко О.В. 481, 495
Токсумаков А.Н. 237
Толеген Н. 273
Толстик А.Л. 41
Торгова С.И. 45
Третьяков С.А. 507
Тропина Е.В. 235
Трунин Д.А. 418
Тчанг Э.М. 413
Тынышова Т.Д. 639
Тюнин А.Н. 595
Тютьков В.С. 543

-У-

Ульянов Я.В. 361, 363, 365, 367
Умаров М.Ф. 489, 499
Урбанович Е.В. 445
Урсов М.А. 143
Урюпина В.К. 141, 153
Ус Н.А. 201
Ушаков А.А. 422
Ушаков Н.А. 185, 193, 467
Ушаков Ф.А. 371, 521
Ушакова Е.В. 63, 437

-Ф-

Фадеев С.В. 107
Федоров В.А. 477
Федоров С.А. 79, 529
Федорова А.В. 505
Федянин А.А. 101
Филатов В.В. 327, 337, 343, 347
Филатова С.А. 169
Фотиади А.А. 165
Фролов А.Ю. 101
Фролов О.О. 403, 409, 413, 418
Фроловцев Д.Н. 39
Фрорип А. 415

-Х-

Хакимов К.Т. 65
Халилов С.И. 535, 537
Халяпин В.А. 531
Харинцев С.С. 117, 321
Харисова Р.Д. 309
Харитонов А.В. 117
Харитонов Д.Ю. 609
Харитончик Р.А. 355, 359
Хатырев Н.П. 371, 591
Хачатрян Д.А. 389
Холина М.С. 385
Хомич А.А. 523
Хомич Ю.В. 53, 57, 133
Хомутская О.В. 581
Хоник В.А. 53
Хопёрский А.Н. 323, 345
Хохлов Н.А. 51
Храмцов Э.А. 633

-Ц-

Царева А.М. 567
Цветков В.Б. 169, 431
Целогородцев К.А. 141, 153
Циплакова Е.Г. 113, 251
Цуканов А.В. 121, 127
Цыкалова А.В. 503
Цыпкин А.Н. 491, 497

-Ч-

Чаморовский Ю.К. 165
Черевков С.А. 437
Черешнев В.О. 577
Черёмхин П.А. 263, 267, 645, 647, 653
Чермошенцев Д.А. 95, 97, 123, 139
Черногорова О.П. 381
Черных А.В. 251, 615
Чехлова Т.К. 69, 431
Чжунбэнь П. 517
Чижин Д.Д. 461
Чижов П.А. 422
Чинь Н.Х. 349, 353, 357
Чиркова И.М. 477
Чистяков А.А. 81, 107, 319
Чмерева Т.М. 317
Чувакова М.А. 35, 479

Чэнь В. 517
Чэнь Г.-П. 109

-Ш-
Шайкин А.А. 57, 133
Шакиров Н.И. 567
Шандаров С.М. 43, 479, 503, 617
Шарангович С.Н. 619, 629
Шариков Д.А. 349
Шатских С.М. 357
Шашковский С.Г. 351
Шевлюга В.М. 422
Шелеманов А.А. 83
Шеляков А.В. 389
Шеманин В.Г. 369
Шепелев С.П. 349
Шеремет В.Г. 301
Шестериков А.В. 237
Шипко В.В. 219
Широкова А.В. 129
Шитиков А.Е. 95, 139
Шитц Д.В. 407
Шифрина А.В. 267, 647, 651
Шишова М.В. 637
Шкадаревич А.П. 633
Шмаков С.С. 43
Штек С.Г. 595
Шубин Я.Р. 137
Шугуров А.И. 55
Шуклов И.А. 61, 65
Шулбаева Д.С. 417
Шульга М.И. 443
Шур В.Я. 35, 479

-Щ-
Щербаков Д.А. 99
Щербина О.Б. 493

-Э-
Эгамов М.Х. 471
Элабедин Г.З. 511, 517
Эргашева О.В. 567

-Ю-
Юдыцкая К.С. 463
Юнусов Т.Р. 123
Юсупов В.И. 75, 103, 135, 401
Юшицына В.В. 191

-Я-
Ядрихинская Д.Р. 327
Якимук В.А. 177, 183
Яковенко Н.А. 439
Яковлев В.О. 209
Якубов С.И. 535, 537
Якубовский Д.И. 237
Якушев М.В. 285
Якушенков П.О. 551
Якущева Г.Г. 145
Яндыбаева Ю.И. 177
Ячменев А.Э. 159