8.4. -2020 отчет

*Ключевые слова*:

Электронная и атомная структура кристаллов, ионные пучки, взаимодействие ионов с веществом, радиационные воздействия, радиационная стойкость наноструктуры, ядерно-физические методы, резерфодовское обратное рассеяние, магнитное сверхтонкое расщепление, магнитные свойства, структуры спинтроники.

Ключевые слова по-английски:

Electronic and atomic structure of crystals, ion beams, interaction of ions with matter, radiation effects, radiation resistance of nanostructures, nuclear physics methods, Rutherford backscattering, magnetic hyperfine splitting, magnetic properties, structures of spintronics.

**РЕФЕРАТ**

В 2021 году по теме 8.4 ”Ядерно-физические методы и физические свойства наноструктур ” проведены работы по синтезу, теоретическому и экспериментальному исследования свойств наноматериалов, используя, в том числе, ядерно-физические методы.

Выполнено спектроскопическое исследование кристаллического Ar, осажденного на поверхности золота. Использовался метод REELS (измерения потерь энергий отраженного электронного пучка) и метод измерения фотоэлектронных спектров при температурах 5 К и 20 К. Также были проведены теоретические расчеты электронного спектра аргона из первых принципов. Экситонный пик в спектрах появляется при энергии около 12 эВ, тогда как ширина щели составляет 14.3-14.4 эВ. Исследована аномалия седловой точки уровней Ландау в графеноподобных структурах.Показано, что у графена в «рациональном» внешнем магнитном поле наблюдаются очень необычные уровни Ландау, расположенные вблизи энергии седловой точки (точка М) εM. Исследована нейтральная и заряженная примесь тория в твердом аргоне. Изотоп тория 229Th обладает уникально низкой энергией ядерного перехода в оптическом диапазоне, что открывает возможность использовать этот переход для очень точного стандарта времени в метрологических целях. Разработаны сенсоры магнитного поля, основанные на эффекте гигантского магнитосопротивления (GMR), имеющие ряд практических преимуществ для текущих и будущих приложений. Исследованы внешние факторы, влияющие на ширину линии ферромагнитного резонанса (ФМР) в двухслойных (ферромагнетик/антиферромагнетик) системах с обменным смещением. образцах Ф / АФ и АФ / АФ. Выполнено исследование электрических и магнитных сверхтонких полей в кристаллическом RhGe, слабо легированном Hf (0,5–2 атомных%), со структурой кубической решетки B20. Выполнено исследование особенностей торможения легких ионов (протонов, дейтронов) в двухслойных аморфных телах и физического распыления поликристаллических материалов при ионной бомбардировке. Разработан метод для оценки сечений перезарядки и неупругих потерь энергии ионов с предравновесным распределением заряда. Выполнено экспериментальное исследование модифицирования микро и наноструктур поверхности углеродного волокна из полиакрилонитрила высокодозным ионным облучением. Получен патент на изобретение антидинатронного покрытия с углеродными нанотрубками. Разработаны новые полимерные многослойные ударостойкие композиты. Разработан новый метод измерения времени жизни возбужденных состояний атомов относительно распада Оже. Разработана квантовая теория зависимости от времени взаимодействия в конечном состоянии при Оже распаде фотовозбужденных состояний атомов в терагерцовом электромагнитом поле. Исследовано влияние ионного облучения на структуру, состав и смачиваемость в многостенных углеродных нанотрубок. Исследована проводимость в композитных материалах на основе ориентированных углеродных нанотрубок. Исследовано влияние видов газовых кластеров на взаимодействие кластеров благородных газов с твердыми поверхностями. Исследовано влияние энергии имплантации ионами Ar+ на фотолюминесценцию пористого кремния. Продолжено изучение радиационных дефектов, возникающих при имплантации ионов 57Fe в тугоплавкие металлы Мо и Та. Продолжено изучение Мессбауэровской спектроскопии сложных магнитных и сегнетоэлектрических материалов.

**Введение**

.

В 2021 году по теме 8.4 ”Ядерно-физические методы и физические свойства наноструктур ” проведены работы по синтезу, теоретическому и экспериментальному исследования свойств наноматериалов, используя, в том числе, ядерно-физические методы.

Выполнено спектроскопическое исследование кристаллического Ar, осажденного на поверхности золота. Использовался метод REELS (измерения потерь энергий отраженного электронного пучка) и метод измерения фотоэлектронных спектров при температурах 5 К и 20 К. Также были проведены теоретические расчеты электронного спектра аргона из первых принципов. Экситонный пик в спектрах появляется при энергии около 12 эВ, тогда как ширина щели составляет 14.3-14.4 эВ. Исследована аномалия седловой точки уровней Ландау в графеноподобных структурах.Показано, что у графена в «рациональном» внешнем магнитном поле наблюдаются очень необычные уровни Ландау, расположенные вблизи энергии седловой точки (точка М) εM. Исследована нейтральная и заряженная примесь тория в твердом аргоне. Изотоп тория 229Th обладает уникально низкой энергией ядерного перехода в оптическом диапазоне, что открывает возможность использовать этот переход для очень точного стандарта времени в метрологических целях. Разработаны сенсоры магнитного поля, основанные на эффекте гигантского магнитосопротивления (GMR), имеющие ряд практических преимуществ для текущих и будущих приложений. Исследованы внешние факторы, влияющие на ширину линии ферромагнитного резонанса (ФМР) в двухслойных (ферромагнетик/антиферромагнетик) системах с обменным смещением. образцах Ф / АФ и АФ / АФ. Выполнено исследование электрических и магнитных сверхтонких полей в кристаллическом RhGe, слабо легированном Hf (0,5–2 атомных%), со структурой кубической решетки B20. Выполнено исследование особенностей торможения легких ионов (протонов, дейтронов) в двухслойных аморфных телах и физического распыления поликристаллических материалов при ионной бомбардировке. Разработан метод для оценки сечений перезарядки и неупругих потерь энергии ионов с предравновесным распределением заряда. Выполнено экспериментальное исследование модифицирования микро и наноструктур поверхности углеродного волокна из полиакрилонитрила высокодозным ионным облучением. Получен патент на изобретение антидинатронного покрытия с углеродными нанотрубками. Разработаны новые полимерные многослойные ударостойкие композиты. Разработан новый метод измерения времени жизни возбужденных состояний атомов относительно распада Оже. Разработана квантовая теория зависимости от времени взаимодействия в конечном состоянии при Оже распаде фотовозбужденных состояний атомов в терагерцовом электромагнитом поле. Исследовано влияние ионного облучения на структуру, состав и смачиваемость в многостенных углеродных нанотрубок. Исследована проводимость в композитных материалах на основе ориентированных углеродных нанотрубок. Исследовано влияние видов газовых кластеров на взаимодействие кластеров благородных газов с твердыми поверхностями. Исследовано влияние энергии имплантации ионами Ar+ на фотолюминесценцию пористого кремния. Продолжено изучение радиационных дефектов, возникающих при имплантации ионов 57Fe в тугоплавкие металлы Мо и Та. Продолжено изучение Мессбауэровской спектроскопии сложных магнитных и сегнетоэлектрических материалов.

**ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

В 2021 году по теме 8.4 ”Ядерно-физические методы и физические свойства наноструктур” проведены работы по синтезу нанокомпозитов, теоретическому и экспериментальному исследования свойств наноматериалов, используя, в том числе, ядерно-физические методы. А именно:

1. **Выполнено спектроскопическое исследование кристаллического Ar, осажденного на поверхности золота.** Использовался метод REELS (измерения потерь энергий отраженного электронного пучка) и метод измерения фотоэлектронных спектров при температурах 5 К и 20 К. Также были проведены теоретические расчеты электронного спектра аргона из первых принципов. Экситонный пик в спектрах появляется при энергии около 12 эВ, тогда как ширина щели составляет 14.3-14.4 эВ [1].
2. **Аномалия седловой точки уровней Ландау в графеноподобных структурах.** Показано, что у графена в «рациональном» внешнем магнитном поле наблюдаются очень необычные уровни Ландау, расположенные вблизи энергии седловой точки (точка М) εM. Уровни вокруг εM, даже в относительно небольших магнитных полях 40-53 Т, уширяются в магнитные мини-зоны. Их максимальная ширина достигает 0.4-0.5 от типичной разницы энергий двух соседних уровней Ландау, хотя у всех остальных уровней Ландау ширина остается практически нулевой. Интересно, что седловая точка не оказывает влияния на диамагнитную восприимчивость графена, которая определяется уровнем Ферми. Предсказано, что подобный эффект имеет место в любой седловой точке, которые встречаются практически в любом материале. В частности, экспериментально эффект уширения магнитных зон может наблюдаться в наносистемах типа двух листов подкрученного графена [2].
3. **Нейтральная и заряженная примесь тория в твердом аргоне**. Изотоп тория 229Th обладает уникально низкой энергией ядерного перехода в оптическом диапазоне, что открывает возможность использовать этот переход для очень точного стандарта времени в метрологических целях. В литературе широко обсуждаются различные возможности внедрения тория в различные материалы с целью изучения и применения его ядерного перехода. В данной работе изучалась необычная природа химической связи между атомом или катионом тория (с зарядом n = 0, 1, 2, 3) тория в конденсированном (твердотельном) аргоне. Расчеты из первых принципов (ab initio) проводились для двухатомной молекулы ThAr и кластеров ThAr4, ThAr4, Thn+Ar18. Химическая связь образовывалась с участием валентных состояний тория и поляризованных состояний аргона. Оказалось, что длина связи Th-Ar уменьшалась, в то время как энергия связи увеличивалась с ростом заряда катиона тория. Во всех случаях спиновое квантовое число было максимально большим в основном состоянии [3].
4. **Сенсоры магнитного поля, основанные на эффекте гигантского магнитосопротивления (GMR).** Сенсоры магнитного поля, основанные на эффекте гигантского магнитосопротивления (GMR), имеют ряд практических текущих и будущих приложений. Рассмотрено изменение магнитосопротивления такого одиночного спин-вентильного сенсора при его линейном перемещении в неоднородном поле магнитной метки при различной ориентации магнитного момента спин-вентильной структуры. Показано, что форма сигнала сенсора и его величина критически зависят от исходной ориентации магнитного момента и траектории движения сенсора в поле магнитной метки. Смоделирован также магниторезистивный отклик движущихся кластеров из нескольких спин-вентильных датчиков GMR на неоднородное поле магнитной метки. Обнаружно, что в зависимости от количества сенсоров в кластере, типов их соединений, ориентации кластера и траектории движения сенсора относительно метки наблюдается большое разнообразие типов откликов. Результаты могут быть использованы для оптимального проектирования устройств позиционирования [4-6].
5. **Внешние факторы, влияющие на ширину линии ферромагнитного резонанса (ФМР).** Исследованы внешние факторы, влияющие на ширину линии ферромагнитного резонанса (ФМР) в двухслойных (ферромагнетик/антиферромагнетик) системах с обменным смещением. Исследованы зависимость ширины линии ФМР от толщины антиферромагнитного (АФ) слоя при неизменной толщине ферромагнитного (Ф) слоя для образцов с различным порядком осаждения Ф- и АФ-слоев, а также корреляция между полем обменного смещения и шероховатостью поверхности образца. Мы наблюдали гораздо бόльшую ширину линии в структурах АФ / Ф по сравнению с образцами Ф / АФ. В системах с антиферромагнетиком, нанесенным на ферромагнитный слой, ширина линии ФМР увеличивается пропорционально среднему размеру шероховатости поверхности. Было обнаружено, что ни обменное смещение, ни шероховатость поверхности / интерфейса в образцах не могут объяснить наблюдаемую разницу ширин. В системах с обратным расположением слоев ширина линии ФМР находится в квадратичной зависимости от одноосной анизотропии и в обратно пропорциональной зависимости от толщины антиферромагнитного слоя, что можно отнести к изменению микроструктуры с толщиной в качестве внешнего фактора демпфирования ФМР. По-видимому, микроструктура подслоя влияет на размер зерен, что приводит к разной угловой дисперсии намагниченности и разному внутреннему полю рассеяния в Ф-слоях, способствуя разной интенсивности рассеяния магнонов и затухания ФМР в образцах Ф / АФ и АФ / АФ [7-9].
6. **Исследование электрических и магнитных сверхтонких полей в кристаллическом RhGe, слабо легированном Hf (0,5–2 атомных%), со структурой кубической решетки B20.** Спектроскопия временнóй дифференциальной возмущенной угловой корреляции (TDPAC) использована для измерения электрических и магнитных сверхтонких полей в диапазоне температур от 5 K до 295 K в кристаллическом RhGe, слабо легированном Hf (0,5–2 атомных%), со структурой кубической решетки B20. Использованы два наиболее часто используемых ядерных зонда: 111In → 111Cd и 181Hf → 181Ta. Экспериментальные результаты в сочетании с теоретическими расчетами функционала электронной плотности показывают, что примеси In / Cd замещают позиции Ge, тогда как зонды Ta / Hf замещают позиции Rh. Обнаружено также, что примесь Ta / Hf сильно искажает локальное кристаллическое окружение, тогда как эффект от зонда In / Cd слабый. Достоверных свидетельств магнитного порядка в исследованных сплавах при низких температурах нет. Работа проведена в сотрудничестве с ИФВД РАН (Троицк) и ОИЯИ (Дубна) [10].
7. **Исследование особенностей торможения легких ионов (протонов, дейтронов) в двухслойных аморфных телах и физического распыления поликристаллических материалов при ионной бомбардировке.** Методом компьютерного моделирования рассчитаны энергетические спектры отраженных частиц при бомбардировке двухслойной мишени Ag/Si легкими ионами (H, D) с энергиями 0.25-10 кэВ с учетом зависимости неупругих энергетических потерь от расстояния наибольшего сближения атомов. Показано, что это приводит к нарушению пропорциональности электронных потерь энергии от скорости движущихся частиц, особенно вблизи порога электронного возбуждения, и может сильно влиять на энергетические спектра отраженных частиц. Это необходимо учитывать при анализе данных поверхностного анализа, получаемых методом вторичной ионной масс-спектрометрии (SIMS) с использованием ионов низких энергий. Предсказана возможность наблюдения изотопных эффектов при отражении ионов H и D от поверхности в области энергий 10 кэВ/а.е.м. и ниже.

Проведено независимое расчетное и экспериментальное исследование углового распределения атомов, распыленных с поверхности поликристалла Cu при облучении ионами Kr с энергией 5 кэВ. В расчетах использованы программы, разработанные разными авторами (программы OKSANA, SDTrimSP и SRIM). Показано, что угловое распределение является существенно надкосинусным, что связано с нескомпенсированным рассеянием эжектируемых атомов на соседних атомах поверхностного слоя. Показано, что данные об угловом распределении, получаемые из измерений эффективности распыления, являются не вполне корректными и должны быть исключены из соответствующих баз данных [11-15 ].

1. **Метод для оценки сечений перезарядки и неупругих потерь энергии ионов с предравновесным распределением заряда.** Для оценки сечений перезарядки предложен метод, который основан на экспериментальных данных, теоретических моделях и эмпирической оценке экспериментальных параметров в равновесном зарядовом распределении ионов. Метод позволяет получить рекомендованные для проведения оценок сечения потери и захвата одного и нескольких электронов в газообразных и твердых мишенях с учетом влияния возбужденных состояний иона и атома мишени [16-18]. Также разработан метод оценки неупругих потерь энергии ионов с предравновесным распределением заряда. Изучены потери энергии ионов в различных неупругих процессах. В этой модели учитывается разница в потерях энергии ионов с разным зарядом. Процесс ионизации атома мишени является основным вкладом в неупругие потери энергии, и потери энергии в процессах изменения заряда для ионов с предравновесным распределением заряда можно рассматривать как поправку [19].
2. **Модифицирование микро и наноструктуры поверхности углеродного волокна из полиакрилонитрила высокодозным ионным облучением.** Экспериментально исследовано, необходимое для армирования композитов, модифицирование микро и наноструктуры поверхности волокна из полиакрилонитрила, а также модельного для графитов высокоориентированного пиролитического графита (ВОПГ), высокодозным облучением ионами инертных газов и азота с энергией от 10 до 30 кэВ при температуре облучения от комнатной до 600оС. Найдены условия ионного облучения для кардинального модифицирования поверхности углеродных волокон, приводящего к продольным и поперечным гофрам субмикронного размера. Найденные закономерности связываются с различными для разных условий облучения профилями радиационных нарушений, приводящих к ионно-индуцированным размерным изменениям, механическим напряжениям и их релаксации. Показана связь ионно-индуцированного гофрирования поверхности с пластическими деформационными процессами углеродных материалах с двумерной структурой. Экспериментально обнаруженный аномальный рост ионно-индуцированного рельефа поверхности ВОПГ при облучении ионами аргона с порогом при 15 кэВ также связывается со специфическими для двумерных материалов процессами релаксации механических напряжений. Результаты опубликованы в работах [20-26].
3. **Антидинатронные покрытия с углеродными нанотрубками**. Зарегистрировано изобретение «АНТИДИНАТРОННОЕ ПОКРЫТИЕ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЫ С ВКЛЮЧЕНИЕМ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК И СПОСОБ ЕГО ПОЛУЧЕНИЯ». Авторы: Воробьева Е.А., Евсеев А.П., Шемухин А.А., Чеченин Н.Г., Татаринцев А.А. Изобретение относится к композитным материалам, которые могут быть использованы для нанесения на поверхность различных деталей для создания антидинатронных покрытий. Антидинатронное покрытие, сформированное на поверхности детали, характеризуется наличием углеродных нанотрубок, при этом покрытие включает, по меньшей мере, первый слой из композитного материала, представляющего собой полимерную матрицу с включением многостенных ориентированных углеродных нанотрубок диаметром от 8 нм и до 250 нм, выполненный толщиной от 0.1 до 1 мм, с плотностью массива ориентированных углеродных нанотрубок от 0.5 до 1 г/см3, с количеством нанотрубок от 5 до 20 масс.% от массы композитного материала. Также заявлен способ получения указанного покрытия. Изобретение обеспечивает получение качественного антидинатронного покрытия на деталях, имеющих сложную форму, при упрощении способа его нанесения без необходимости использования высокотемпературной обработки детали [27,28].
4. **Полимерные многослойные ударостойкие композиты**. Нанокомпозиты - это новый тип материала, который отличается от обычных композитных материалов размером затвердевающей фазы. Одним из наиболее перспективных наполнителей для нанокомпозитов являются углеродные нанотрубки. В работе исследованы структурно-функциональные свойства полимерных композиционных материалов на основе эпоксидных смол, армированных углеродными нанотрубками. Исследована ударопрочность при высокоскоростном воздействии многослойных композитов, представляющих собой многослойные конструкции из стеклоткани и базальтовой ткани, пропитанной полимером на основе эпоксидных смол [29].
5. **Новый метод измерения времени жизни возбужденных состояний атомов относительно распада Оже**. Совместно с экспериментальной группой A. L. Cavalieri, предложен и реализован новый метод измерения времени жизни возбужденных состояний атомов относительно распада Оже. Метод основан на измерении временной развертки фото- и Оже электронов в терагерцовом электромагнитном поле. Развито теоретическое описание этого метода (совместно с А. К. Казанским). Результаты опубликованы в Nature Physics [30].
6. **Квантовая теория зависимости от времени взаимодействия в конечном состоянии при Оже распаде фотовозбужденных состояний атомов в терагерцовом электромагнитом поле** Разработана квантовая теория зависимости от времени взаимодействия в конечном состоянии при Оже распаде фотовозбужденных состояний атомов в терагерцовом электромагнитом поле. Проведены расчёты для ряда атомов благородных газов. Результаты сравниваются с расчётами в квазиклассическом подходе. Работы опубликованы в двух статьях в журналах Phys. Rev. A и J. Phys. B. [31-34].
7. **Влияние ионного облучения на структуру, состав и смачиваемость в многостенных углеродных нанотрубок.** Представлено исследование влияния облучения ионами на структуру, состав смачиваемость многостенных углеродных нанотрубок. Были приготовлены таблетки из прессованных нанотрубок двух типов разного диаметра и облучены ионами аргона и гелия. Рамановская и рентгеновская фотоэлектронные спектроскопии показали различия в скорости образования радиационно-индуцированных дефектов для разных типов нанотрубок при различных параметрах ионного облучения. Образование поперечных связей между слоями нанотрубок при ионном облучении было продемонстрировано с помощью моделирования молекулярной динамики. Показан, что контактный угол смачиваемости резко меняется с увеличением потока для различных всех типов нанотрубок: при низких потоках образуются супергидрофобные поверхности, при увеличении потока наблюдается значительное уменьшение угла смачиваемости, особенно для нанотрубок меньшего диаметра. [35-38].
8. **Проводимость в композитных материалах на основе ориентированных углеродных нанотрубок.** Рассмотрены перспективы композиционных материалов на основе полимерных матриц с включением углеродных нанотрубок, в том числе ориентированных углеродных нанотрубок, как функциональных, так и конструкционных материалов для наноспутников. Были измерены теплопроводность и электропроводность композитов. Предложены методы получения углеродных нанотрубок, в том числе вертикально ориентированных нанотрубок, синтезированных на нитях, и коаксиальных регулярных наномезоструктур в качестве функциональной добавки для изменения свойств материалов. [39].
9. **Влияние видов кластеров на взаимодействие кластеров благородных газов с твердыми поверхностями.** Было исследовано влияние кластеров благородных газов на взаимодействие кластеров с твердыми поверхностями. Процессы взаимодействия кластеров Ar, Kr и Xe с поверхностями Cu и Mo были изучены с использованием моделирования молекулярной динамики. Показано, что более легкие передние атомы кластера подвергаются большему обратному рассеянию от поверхностных атомов, вызывая более интенсивные множественные столкновения между атомами кластера. Это влияет на проникновение в кластер, обмен энергией между кластером и поверхностными атомами и термализацию кластера. Обсуждается влияние энергии на атом кластера на эти эффекты. [40].
10. **Влияние энергии имплантации ионами Ar+ на фотолюминесценцию пористого кремния**. Проведено облучение пористого кремния ионами Ar+ при энергиях от 100 до 400 кэВ и флюенсе 1012 см−2. Изучено влияние ионного облучения при различных энергиях падающих частиц на спектр фотолюминесценции пористого кремния. показано, что спектр фотолюминесценции состоит из двух составляющих. Один из них связан с наличием структурных дефектов; другой - с поверхностными состояниями на сложной поверхности пористого кремния. Предложен метод оценки толщины люминесцентного слоя, основанный на анализе пика фотолюминесценции, связанного с дефектами [41].
11. **Проблемы темнового тока для высокоградиентного медицинского линейного ускорителя C-диапазона**. Обсуждаются проблемы темнового тока для высокоградиентного медицинского линейного ускорителя C-диапазона [42].
12. **Изучение радиационных дефектов, возникающих при имплантации ионов 57Fe в тугоплавкие металлы Мо и Та.** Экспериментальные исследования проводились методами мессбауэровской спектроскопии и EXAFS (тонкая структура поглощения рентгеновских лучей) совместно с Институтом Ядерной Физики республики Казахстан и Курчатовским научным центром (Москва). Были проанализированы спектры EXAFS, полученные на Синхротронном источнике Курчатовского института вблизи К-края Fe. Метод EXAFS дает согласованные результаты с данными мессбауэровской спектроскопии. Показано, что в матрице Мо атомы Fe преимущественно локализованы в позициях замещения ОЦК кристаллической решетки, а в матрице Та атомы Fe локализованы в позициях замещения и внедрения. Позиции внедрения определены, как гантель Fe-Ta, расположенная вдоль диагонали <111>. Показано, что отжиг образцов при 700 ̊С ведет к усилению сегрегации атомов Fe и исчезновению позиций внедрения. [43]
13. **Мессбауэровская спектроскопия сложных магнитных и сегнетоэлектрических материалов. П**роведены мессбауэровские исследования нанокристаллических порошков магнетита Fe304. Показано, что при небольшом нагреве до температуры 350 °С в атмосфере водорода происходит почти полное восстановление окиси до металлического железа. Этот результат может иметь важное прикладное значение, он опубликован в статье в журнале RSC Advances [44].

По результатам выполненных исследований в 2021 г. опубликовано 42 статьи в журналах, из них 32 в журналах, индексируемых в WoS (25) и SCOPUS (7), получено 2 патента и защищена 1 кандидатская диссертация.

**Публикации:**

1. 2021 Kurelchuk U.N., Borisyuk P.V., Chubunova E.V., Karazhanov S.Z., Kolachevsky N.N., Lebedinskii Yu Yu, Myzin D.A., **Nikolaev A.V.,** Tkalya E.V. Spectroscopic studies of solid Ar condensed on a gold surface. Materials Letters, 130930 (2021). ISSN 0167-577X, https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.130930.
2. 2021 **Nikolaev A.V.,** Saddle point anomaly of Landau levels in graphenelike structures. Physical Review B, 104 (3), 035419 (2021)., DOI: 10.1103/PhysRevB.104.035419.
3. 2021 Nikolaev A.V., Tkalya E.V. Neutral and charged thorium impurity in solid argon. Physical Review A, 104 (3), 032819 (2021). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.104.032819>.
4. 2021 [**Бабайцев Г.В.**](https://istina.msu.ru/workers/9571409/)**,** [**Чеченин Н.Г.**](https://istina.msu.ru/workers/1336415/)**,** [**Джунь И.О.**](https://istina.msu.ru/workers/384655/)**,** [**Ромашкина И.Л.**](https://istina.msu.ru/workers/560819/)**,** [**Козин М.Г.**](https://istina.msu.ru/workers/560818/)**,** [**Макунин А.В.**](https://istina.msu.ru/workers/1348033/) [Спин-вентильный сенсор в магнитном поле движущейся метки](https://istina.msu.ru/publications/article/388811759/) // [Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия](https://istina.msu.ru/journals/94017/). 2021, № 4, с. 58-62
5. 2021 [Babaytsev1 G.V.](https://istina.msu.ru/workers/9571409/), [Chechenin N.G.](https://istina.msu.ru/workers/1336415/), [Dzhun I.O.](https://istina.msu.ru/workers/384655/), [Romashkina I.L.](https://istina.msu.ru/workers/560819/), [Kozin M.G.](https://istina.msu.ru/workers/560818/), [Makunin A.V.](https://istina.msu.ru/workers/1348033/) [A Spin-Valve Sensor in the Magnetic Field of a Moving Label](https://istina.msu.ru/publications/article/402750077/) // [Moscow University Physics Bulletin](https://istina.msu.ru/journals/382331/), 2021, v 76, № 4, p. 246-251)
6. 2021 [**Babaytsev G.V.**](https://istina.msu.ru/workers/9571409/)**,** [**Chechenin N.G.**](https://istina.msu.ru/workers/1336415/)**,** [**Dzhun I.O.**](https://istina.msu.ru/workers/384655/)**,** [**Kozin M.G.**](https://istina.msu.ru/workers/560818/)**,** [**Makunin A.V.**](https://istina.msu.ru/workers/1348033/)**,** [**Romashkina I.L.**](https://istina.msu.ru/workers/560819/) [Clusters of Spin Valve Sensors in 3D Magnetic Field of a Label](https://istina.msu.ru/publications/article/373454527/) // [Sensors](https://istina.msu.ru/journals/88048/), 2921, v. 21, p. 1-12
7. 2021 [**Джунь И.О.**](https://istina.msu.ru/workers/384655/)**,** [**Бабайцев Г.В.**](https://istina.msu.ru/workers/9571409/)**,** [**Козин М.Г.**](https://istina.msu.ru/workers/560818/)**,** [**Ромашкина И.Л.**](https://istina.msu.ru/workers/560819/)**,** [**Шанова Е.И.**](https://istina.msu.ru/workers/2851906/)**,** [**Чеченин Н.Г.**](https://istina.msu.ru/workers/1336415/) [Влияние внешних факторов на ширину линии ферромагнитного резонанса в структурах с обменным смещением](https://istina.msu.ru/publications/article/360275055/) // [Физика твердого тела](https://istina.msu.ru/journals/97211/), 2021, , т. 63, № 6, с. 693-699
8. 2021 [**Dzhun I.O.**](https://istina.msu.ru/workers/384655/)**,** [**Babaitsev G.V.**](https://istina.msu.ru/workers/9571409/)**,** [**Kozin M.G.**](https://istina.msu.ru/workers/560818/)**,** [**Romashkina I.L.**](https://istina.msu.ru/workers/560819/)**,** [**Shanova E.I.**](https://istina.msu.ru/workers/2851906/)**,** [**Chechenin N.G.**](https://istina.msu.ru/workers/1336415/) [Effect of External Factors on the Ferromagnetic Resonance Line Width in Exchange-Biased Structures](https://istina.msu.ru/publications/article/388811919/) // [Physics of the Solid State](https://istina.msu.ru/journals/83256/), издательство [Russian Academy of Sciences](https://istina.msu.ru/publishers/79145/) *(Russian Federation)*, v. 63, № 6, p. 807-813)
9. 2021 [**Chechenin N.G.**](https://istina.msu.ru/workers/1336415/)**,** [**Dzhun I.O.**](https://istina.msu.ru/workers/384655/)**,** [**Babaytsev G.V.**](https://istina.msu.ru/workers/9571409/)**,** [**Kozin M.G.**](https://istina.msu.ru/workers/560818/)**,** [**Makunin A.V.**](https://istina.msu.ru/workers/1348033/)**,** [**Romashkina I.L.**](https://istina.msu.ru/workers/560819/) [FMR Damping in Thin Films with Exchange Bias](https://istina.msu.ru/publications/article/370246829/) // [Magnetochemistry](https://istina.msu.ru/journals/69558095/), 2021,v. 7, p. 1-10
10. 2021 [Salamatin D.A.](https://istina.msu.ru/workers/7630377/), [Tsvyashchenko A.V.](https://istina.msu.ru/workers/1351667/), [Salamatin A.V.](https://istina.msu.ru/workers/3853245/), [Velichkov A.](https://istina.msu.ru/workers/1351775/), [Magnitskaya M.V.](https://istina.msu.ru/workers/46156289/), [Chtchelkatchev N.M.](https://istina.msu.ru/workers/46154635/), [Sidorov V.A.](https://istina.msu.ru/workers/3794234/), [Fomicheva L.N.](https://istina.msu.ru/workers/3853246/), [Mikhin M.V.](https://istina.msu.ru/workers/96850058/), [**Kozin M.G.**](https://istina.msu.ru/workers/560818/)**,** [**Nikolaev A.V.**](https://istina.msu.ru/workers/434660/)**,** [**Romashkina I.L.**](https://istina.msu.ru/workers/560819/), [Budzynski M.](https://istina.msu.ru/workers/1002440/) [Hyperfine field studies of the high-pressure phase of noncentrosymmetric superconductor RhGe (B20) doped with hafnium](https://istina.msu.ru/publications/article/320303943/) // [Journal of Alloys and Compounds](https://istina.msu.ru/journals/70867/),2021, v. 850, 156601
11. 2021 A. Schinner, **V.I. Shulga**, P. Sigmund. Threshold behavior and isotope effect in low-energy electronic stopping of light ions. J. Appl. Phys. 2021. V. 129. P. 185304.
12. 2021 A. Afkir, M. Ait El Fqih, L. Jadoual, **V. I. Shulga**, A. Kaddouri. Angular distribution of particles sputtered from a copper target by 5-keV Kr ions: Experiment and simulation study. Surf. Interface Anal. 2021. V. 53. P. 792-797.
13. 2021 **В.И. Шульга**. Энергетические спектры водорода и дейтерия низких энергий при отражении от двухслойных мишеней. Тезисы докладов 50-й Международной Тулиновской конференции по взаимодействию заряженных частиц с кристаллами, Москва, 25-27 мая 2021.
14. 2021 P. Sigmund, A. Schinner, **V. I. Shulga**. Electronic stopping below 10 keV/u. Труды 25-й Международной конференции по взаимодействию ионов с поверхностью (ISI-2021), Ярославль, 23-27 августа 2021. T. I. С. 19-24.
15. 2021 P. Sigmund, A. Schinner, **V. I. Shulga**. Progress in understanding low-velocity electronic stopping. Symposium on high-resolution depth profile, Adelaide, Australia, 8-9 ноября 2021.
16. 2021 **Н. В. Новиков, Теплова Я.А.** ОЦЕНКА СЕЧЕНИЙ ПЕРЕЗАРЯДКИ ПРИ ИОН-АТОМНЫХ СТОЛКНОВЕНИЯХ. ПОВЕРХНОСТЬ. РЕНТГЕНОВСКИЕ, СИНХРОТРОННЫЕ И НЕЙТРОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, 2021, № 3, с. 44–56. DOI: 10.31857/S1028096021030109
17. 2021 **N. V. Novikov, Ya. A. Teplova** Evaluation of the Charge-Changing Cross Sections for Ion—Atom Collisions. Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2021, Vol. 15, No. 2, pp. 247–258. DOI: 10.1134/S1027451021020105
18. 2021 **N.V. Novikov** Empirical method evaluation of charge – Changing cross sections. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. V. 506, P.1–7. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nimb.2021.09.002
19. 2021 **N.V. Novikov**. Inelastic energy losses for ions with pre-equilibrium charge distribution. Radiation Physics and Chemistry, Elsevier (United States), V.189, P. 109699. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2021.109699
20. 2021. N. N. Andrianova, A. M. Borisov, **E. S. Mashkova, M.A. Ovchinnikov,** M.F. Timofeev***,*** E.A. Vysotina. Surface patterns formation by ion irradiation of PAN based сarbon fibers // Vacuum. —Т. 188. — С. 110177.
21. 2021. Н. Н. Андрианова, А. М. Борисов, Е. А. Высотина, ***М. А. Тимофеев. Е.С. Машкова, М.А. Овчинников*** Субмикронное гофрирование углеродного волокна из полиакрилонитрила высокодозным ионным облучением. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. —№ 3. С. 24–30.
22. 2021. Н. Н. Андрианова, А. М. Борисов, **А. В. Макунин** и др. Формирование поверхностных структур при облучении углеродных волокон из полиакрилонитрила ионами гелия и аргона // Материалы XXIV конференции Взаимодействие плазмы с поверхностью, 4-5 января 2021г. С. 58–60.
23. 2021. N. N. Andrianova, A. M. Borisov, **E. S. Mashkova, M. A. Ovchinnikov**, V.S. Sevostyanova // Anomalous evolution of the ion-induced surface relief of highly oriented pyrolytic graphite / Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — Vol. 2144, no. 1. — P. 012022.
24. 2021 Н. Н. Андрианова, А. М. Борисов, **А. В. Макунин** и др. / Модификация структуры поверхности углеродных волокон из ПАН высокодозным ионным облучением// Взаимодействие ионов с поверхностью. ВИП-2021. Труды 25 межд. конф. Ярославль, Россия, 23-27 августа г. — Т. 2., С. 35–38.
25. 2021 Андрианова Н.Н., Борисов А.М., **Машкова Е.С., Овчинников М.А.,** Севостьянова В.С. / Эволюция поверхности высокоориентированного пирографита при ионно-лучевой эрозии // Быстрозакаленные материалы и покрытия // Материалы XVIII-й Международной научно-технической конференции. 19-20 октября 2021 г. — С. 212–216.
26. 2021 Apelfeld A., Borisov A., Dyakov I., Grigoriev S., Krit B., Kusmanov S., Silkin S., Suminov I., Tambovskiy I. Enhancement of Medium-Carbon Steel Corrosion and Wear Resistance by Plasma Electrolytic Nitriding and Polishing, в журнале Metals, издательство MDPI (Basel, Switzerland), том 11, № 10, с. 1599 DOI: 10.3390/met11101599
27. 2021 **Шемухин А. А., Татаринцев А. А., Воробьева Е. А., Чеченин Н. Г.** АНТИДИНАТРОННОЕ ПОКРЫТИЕ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЫ С ВКЛЮЧЕНИЕМ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК И СПОСОБ ЕГО ПОЛУЧЕНИЯ https://yandex.ru/patents/doc/RU2745976C1\_20210405
28. 2021 Пешнина Д.О., Воробьева Е.А., Евсеев А.П., Татаринцев А.А., Шемухин А.А. Характеристики вторичной электронной эмиссии полимерных композитов, армированных углеродными нанотрубками, при облучении электронным пучком. XXII межвузовская молодежная научная школа-конференция имени Б. С. Ишханова "Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине". 22-23 ноября 2021. МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия. <https://istina.msu.ru/conferences/presentations/412076227/>
29. 2021 [Kobzev V.A.](https://istina.msu.ru/workers/11983261/" \o "Кобзев Виталий Андреевич (перейти на страницу сотрудника)), [Chechenin N.G.](https://istina.msu.ru/workers/1336415/), [Bukunov K.A.](https://istina.msu.ru/workers/9326529/" \o "Букунов Кирилл Александрович (перейти на страницу сотрудника)), [Vorobyeva E.A.](https://istina.msu.ru/workers/1427522/" \o "Воробьева Екатерина Андреевна (перейти на страницу сотрудника)), [Makunin A.V.](https://istina.msu.ru/workers/1348033/" \o "Макунин Алексей Владимирович (перейти на страницу сотрудника)) [Synthesis and research of polymer composites reinforced with carbon nanotubes using computer models](https://istina.msu.ru/publications/article/353447810/). в журнале [Journal of Physics: Conference Series](https://istina.msu.ru/journals/75027/), издательство [IOP Publishing](https://istina.msu.ru/publishers/280035/) ([Bristol, UK], England), том 1758, с. 012015-1-012015-8 [DOI](http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1758/1/012015): [10].1088/1742-6596/1758/1/012015
30. 2021 D. C. Haynes, M. Wurzer, A. Schletter, A. Al-Haddad, C. Blaga, C. Bostedt, J. Bozek, H. Bromberger, M. Bucher, A. Camper, S. Carron, R. Coffee, J. T. Costello, L. F. DiMauro, Y. Ding, K. Ferguson, I. Grguras, W. Helml, M. C. Hoffmann, M. Ilchen, S. Jalas, **N. M. Kabachnik**, A. K. Kazansky, R. Kienberger, A. R. Maier, T. Maxwell, T. Mazza, M. Meyer, H. Park, J. Robinson, C. Roedig, H. Schlarb, R. Singla, F. Tellkamp, P. A. Walker, K. Zhang, G. Doumy, C. Behrens and A. L. Cavalieri, Clocking Auger electrons. Nature Physics, 17 (2021) 512-518.
31. 2021 I. J. Bermudez Macias, S. Dusterer, R. Ivanov, U. Fruhling and **N. M. Kabachnik**, Post-collision interaction effect in THz-assisted Auger decay of noble gas atoms. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 54 (2021) 085601 (7pp).
32. 2021 M. Wieland, **N.M. Kabachnik**, M. Drescher, Y. Deng, Y. Arbelo, N. Stojanovic,B. Steffen, J. Roensch-Schulenburg, R. Ischenbeck, A. Malyzhenkov, E. Prat, and P. Juranic, Deriving X-ray pulse duration from center-of-energy shifts in THz-streaked ionized electron spectra. Optics Express 29 (2021) 32739-32754.
33. 2021. P. Grychtol, D.E. Rivas, T.M. Baumann, R. Boll, A. De Fanis, B. Erk, M. Ilchen, Jia Liu, T. Mazza, J. Montano, J. Muller, V. Music, Y. Ovcharenko, N. Rennhack, A. Rouzee, P. Schmidt, S. Schulz, S. Usenko, R. Wagner, P. Ziolkowski, H. Schlarb, J. Grunert, **N.M. Kabachnik**, and M. Meyer, Timing and X-ray pulse characterization at the Small Quantum Systems instrument of the European X-ray Free Electron Laser. Optics Express 29 (2021) 37429-37442.
34. 2021. I. J. Bermudez Macias, I. P. Sazhina, R. Ivanov, S. Dusterer, and **N. M. Kabachnik**, Time-dependent post-collision-interaction effects in THz-field-assisted Auger decay. Phys. Rev. A 104 (2021) 053102 (8 pp)
35. 2021 **Evseev A.P., Vorobyeva E.A., Balakshin Yu V.,** Kushkina K.D., Stepanov A.V., **Chernysh V.S., Chechenin N.G., Shemukhin A.A**. //MWCNT-based surfaces with tunable wettability obtained by He+ ion irradiation в журнале SURFACES AND INTERFACES, том 23, 100955, DOI: 10.1016/j.surfin.2021.100955
36. 2021 **Evseev A.P., Balakshin Yu V., Vorobyeva E.A.,** Stepanov A.V., Kushkina K.D., Tatarintsev A.A., **Shemukhin A.A.** The Effect of Ion Irradiation Fluence on the Structure of Multiwall Carbon Nanotubes with Different Diameters // в журнале Moscow University Physics Bulletin, издательство Allerton Press (New York, N.Y., United States), том 76, № 2, с. 84-88 DOI
37. 2021 Elsehly Emad M., Chechenin Nikolay G., Shemukhin Andrey A., Motaweh Hussien A. / Enhancing the Surface Properties and Structure of MWNTs by Effective Ion Beam Irradiation в журнале Nanoarchitectonics, издательство Universal Wiser Publisher (Singapore), том 2, № 2, с. 101-108 DOI: 10.37256/nat.2220211003
38. 2021 Elsehly E.M., Evseev A.P., Vorobyeva E.A., Balakshin Yu V., Chechenin N.G., Shemukhin A.A., //The influence of argon ion irradiation on the filtration properties of multi-walled carbon nanotubes// в журнале Technical Physics Letters, издательство Pleiades Publishing, Ltd (Road Town, United Kingdom)
39. 2021 **Vorobyeva E.A., Evseev A.P.,** Petrov V.L**., Shemukhin A.A., Chechenin N.G.** // The conductivity in Composite Materials Based on Oriented Carbon Nanotubes // в журнале Moscow University Physics Bulletin, издательство Allerton Press (New York, N.Y., United States), том 76, № 1, с. 29-35 DOI: 10.3103/s0027134921010112
40. 2021 **Nazarov Anton V., Chernysh Vladimir S.**, Zavilgelsky Andrey D., **Shemukhin Andrey A.,** Lopez-Cazalilla Alvaro, Djurabekova Flyura, Nordlund Kai. The cluster species effect on the noble gas cluster interaction with solid surfaces // в журнале SURFACES AND INTERFACES, № 26 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2021.101397>
41. 2021 Kozhemiako A.V., **Shemukhin A.A., Nazarov A.V**., Spivak Yu M., Muratova E.N., **Chernysh V.V.** Influence of the implantation energy with Ar+ ions on the photoluminescence of porous silicon // в журнале Moscow University Physics Bulletin, издательство Allerton Press (New York, N.Y., United States), № 6, с. 590-595 DOI: 10.3103/S0027134920060120
42. 2021 **Chernysh V.S**., Ermakov A.N., Ieshkin A.E., **Kireev D.S.,** Khankin V.V., Ovchinnikova L.Y., Shvedunov V.I., Tatarintsev A.A., Yurov D.S.// Dark current issues for high gradient C-band medical linac // в журнале Journal of Instrumentation, издательство IOP Publishing ([Bristol, UK], England), том 16, № 2 DOI
43. 2021 Andrianov V.A., Bedelbekova K.A., Trigub A.L. “Study of Radiation Defects in metal Mo and Ta by Mossbauer effect and EXAFS.”, // Vacuum 193 (2021) 110521(1-7). <https://doi.org/10.1016/J.Vacuum.2021.110521>
44. 2021 [Chernavsky](https://istina.msu.ru/workers/494149/) P.A., [Kim N.V.](https://istina.msu.ru/workers/243981459/), [Andrianov](https://istina.msu.ru/workers/520696/) V.A., [Perfiliev](https://istina.msu.ru/workers/1662332/) Yu.D., [Novakova](https://istina.msu.ru/workers/525015/) A.A., [Perov](https://istina.msu.ru/workers/414591/) N.S. «[The influence of an external magnetic field on the dynamics of magnetite reduction with hydrogen"](https://istina.msu.ru/publications/article/368390006/). [RSC Advances](https://istina.msu.ru/journals/279127/), издательство[Royal Society of Chemistry](https://istina.msu.ru/publishers/47600/) (United Kingdom), том 11, (2021), №25, с. 15422-15427. [DOI](http://dx.doi.org/10.1039/d1ra01200b): [doi.org/10.1039/D1RA01200B](https://doi.org/10.1039/D1RA01200B)

Защищена (Балакшин Ю.В., дата защиты 26.11.2021) в диссертационном совете МГУ.01.11 МГУ имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына. Работа выполнена в ОФАЯ НИИЯФ МГУ имени М.В. Ломоносова.

**Научное и научно-техническое сотрудничество**: -

Коллектив сотрудничает с рядом Российских организаций:

1) НИЦ «Курчатовский институт»

2) ОИЯИ г. Дубна

3) МАИ - Федеральный государственный бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

4) Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

5) Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

6) Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калиниград, Россия

4) АО «ГКНПЦ им.М.В. Хруничева», НИИ КС имени А.А.Максимова

Международные организации

6) Даманхурский университет (Египет)

7) Гронингенский университет (Нидерланды)

7) Университет Хельсинки, Финляндия

8) Технический университет Вены, Австрия

9) Институт Винча, Белград, Сербия

**Заключение**

Полученные новые экспериментальные данные и результаты теоретических исследований могут быть использованы для оценки потенциальных функциональных свойств наноматериалов, их стойкости к воздействию окружающей среды и факторов космического пространства, оценки перспективы их индустриального и бытового использования.

Планы и Техническое Задание по теме 8.4 ” Ядерно-физические методы и физические свойства наноструктур” на 2021 г. полностью выполнены.