

НАПРАВЛЕННОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ БЛОХОВСКИХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН С ПОМОЩЬЮ МИ-РЕЗОНАНСНЫХ НАНОЧАСТИЦ

Д. Н. Гулькин^{1*}, А. А. Попкова¹, Б. И. Афиногенов¹,
Д. А. Шилкин¹, В. О. Бессонов^{1,2}, А. А. Федянин¹

¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова 119991, Российская Федерация,
Москва, Ленинские горы, 1-2,

*E-mail: gulkin@nanolab.phys.msu.ru

²ИФХЭ им. А.Н. Фрумкина РАН, 119071, Российская Федерация, Москва, Ленинский пр-т., 31-4

Работа сосредоточена на обнаружении и изучении эффекта направленного возбуждения блоховских поверхностных волн при помощи одиночных полупроводниковых наночастиц, расположенных на поверхности одномерного фотонного кристалла. В работе показано, что субволновая ми-резонансная частица может выступать в качестве спектрального демультиплексора, переключающего направление возбуждения блоховской поверхностной волны с прямого на обратное в спектральном диапазоне 30 нм с центральной длиной волны, определяемой размером наночастицы. Исследование проведено методом микроскопии утечки излучения, позволяющей одновременно визуализировать распространения света как в координатном пространстве, так и в пространстве волновых векторов.

Исследование платформ интегральной оптики для управления распространением света и создание элементной базы для них является важным направлением фотоники. Оптимальная платформа для реализации элементов должна отвечать современным требованиям, таким как спектральная гибкость, малые оптические потери и плотная упаковка оптических компонентов. Наряду с известными поверхностными плазмон-поляритонами (ППП) получает распространение перспективная платформа на основе блоховских поверхностных волн (БПВ) в одномерных фотонных кристаллах. БПВ представляют из себя поверхностные электромагнитные состояния на границе раздела одномерного фотонного кристалла (ФК) и диэлектрика. Использование той или иной платформы зависит от области её применения: БПВ являются многообещающей платформой для использования в интегральной фотонике на частотах от УФ до среднего ИК, поскольку БПВ обладают большой длиной распространения, превышающей в данном диапазоне длину распространения ППП. Также БПВ позволяют локализовать поле не только на поверхности ФК, но и в слое диэлектрика, позволяя таким образом использовать диэлектрические структуры на поверхности ФК в качестве элементов для управления распространением оптического излучения. Уже разработаны основные элементы интегральной оптики на основе БПВ, такие как резонаторы, интерферометры, волноводы [1]. Однако при этом сами способы возбуждения поверхностных волн являются недостаточно изученным направлением. Поскольку волновой вектор БПВ выше волнового вектора света в воздухе, то для возбуждения БПВ требуются специальные оптические схемы. Как правило, в качестве метода возбуждения БПВ используют наиболее изученные и самые простые с точки зрения эксперимента схемы: дифракционные решётки или призмённые схемы (Кречмана и Отто). Однако при этом они имеют ряд недостатков: они либо слишком громоздкие (призмённые), либо малоэффективные (дифракционные). Поиск новых способов возбуждения БПВ, лишённых этих недостатков, является важной задачей.

Широкое использование в задачах для управления светом получили диэлектрические наноантенны на основе одиночных субволновых частиц с высоким показателем преломления, поддерживающих резонансы типа Ми, для которых существует возможность контролируемым способом изменять диаграмму рассеянного на частицах света. С помощью метода лазерно-индуцированного переноса данные частицы могут быть помещены на любую диэлектрическую поверхность [2], например, могут быть помещены в область локализации БПВ, позволяя, таким образом, управлять диаграммой направленности рассеянного света. Недавно с помощью ми-резонансных частиц кремния, помещённых на плёнку золота и выступающих в качестве демультиплексора, наблюдалось перестраиваемое направленное возбуждение ППП [3].

В данной работе предлагается метод цветочувствительного направленного возбуждения БПВ. С помощью метода лазерно-индуцированного обратного переноса наночастицы кремния, поддерживающие резонансы типа Ми, были помещены на поверхность ФК. Впервые экспериментально и численно продемонстрировано эффективное возбуждение резонансов типа Ми внутри кремниевых частиц, ведущих к направленному возбуждению БПВ на поверхности фотонного кристалла как в прямом, так и в обратном направлениях. Схема эксперимента проиллюстрирована на рис. 1а. Излучение направляется под углом θ на частицу, расположенную на поверхности ФК. Рассеянное на частице излучение собирается с помощью метода микроскопии утечки излучения и иммерсионного объектива (ЧА=1.3). В задней фокальной плоскости (ЗФП) этого объектива формируется изображение волновых векторов рассеянного на частице излучения. Подобное фурье-преобразование рассеянного излучения позволяет удобно демонстрировать эффект направленного возбуждения поверхностных волн в ЗФП, в которой БПВ выглядит как яркие дуги за пределами светового конуса (ЧА > 1).



Рис. 1. Направленное возбуждение БПВ с помощью ми-резонансных частиц:
а – схема эксперимента, б – изображения ЗФП для различных длин волн возбуждения для кремниевой частицы диаметром 210 нм. Яркая дуга в ЗФП в диапазоне ЧА ∈ [1; 1.3] соответствует БПВ.

Изменяя длину волны излучения в видимой и ближней ИК-области спектра и подбирая другие параметры частиц, можно изменять условия для возбуждения БПВ. Цветоселективная направленность достигается за счёт возбуждения в частице различных резонансов типа Ми. Таким образом, одиночная кремниевая частица может действовать как субволновой демультиплексор. На рис. 1б проиллюстрировано направленное возбуждение БПВ для частицы размером 210 нм. Показано переключение направления возбуждения БПВ с преимущественно прямого на преимущественно обратное в спектральном диапазоне 30 нм. Варьируя параметры фотонного кристалла, можно управлять диаграммами возбуждения БПВ и изменять дисперсию поддерживаемых мод, что позволяет сместить рабочий спектральный диапазон в видимую область спектра. Показано, что эффективность возбуждения БПВ таким способом может составить 8% с помощью одной наночастицы для предлагаемой схемы освещения. Предложенная схема демультиплексора может быть легко интегрирована в существующие платформы и устройства методом лазерно-индуцированного переноса.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского Научного Фонда № 21-72-00123.

Список литературы

1. K.R. Safronov, D.N. Gulkin, I.M. Antropov et al. Multimode interference of Bloch surface electromagnetic waves // *ACS Nano*, 14(8), 10428-10437 (2020).
2. A.I. Kuznetsov, J. Koch, B. N. Chichkov, Laser-induced backward transfer of gold nanodroplets // *Opt. Express* 17, 18820–18825 (2009).
3. I.S. Sinev, A.A. Bogdanov, F.E. Komissarenko et al., Chirality driven by magnetic dipole response for demultiplexing of surface waves // *Laser Photon. Rev.* 11, 1700168, 2017.