

**«УТВЕРЖДАЮ» Проректор
Московского государственного
университета
имени М.В. Ломоносова**

Профессор А.А. Федянин

« » 2018 г.

ОТЗЫВ

Ведущей организации «Физический факультет Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова» на диссертационную работу Рыбина Михаила Валерьевича «Резонансные эффекты в электромагнитных спектрах фотонных кристаллов и метаматериалов», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Работа посвящена исследованию резонансного взаимодействия света с рядом объектов, обладающих свойствами фотонных кристаллов и метаматериалов, особое внимание уделяется определению качественных различий оптических эффектов в этих двух классах объектов, а также переходам между ними.

Актуальность работы

В последние годы большое внимание исследователей уделяется структурированным на различных масштабах оптическим материалам, таким как метаматериалы и фотонные кристаллы. Такое внимание объясняется целым рядом наблюдаемых в этих объектах ярких резонансных эффектов. В отличие от фотонных кристаллов, распространение света в метаматериалах может быть описано традиционным способом при помощи материальных параметров – диэлектрической проницаемости и магнитной восприимчивости, которые связаны с электрическим и магнитным откликом на отдельных структурных элементах. Более того, желаемые значения диэлектрической проницаемости и магнитной восприимчивости могут быть получены путем правильного подбора и организации в пространстве структурных элементов метаматериала. Таким образом можно добиться и их отрицательных значений. При помощи метаматериалов можно сконструировать

разнообразные элементы будущих оптоэлектронных устройств, плоские линзы, левосторонние среды и прочее, так как структурирование может существенным образом изменить присущую материалам резонансную частотную дисперсию, нелинейность, оптическую активность или анизотропию. Все эти факторы определяют большой интерес научного сообщества к изучению резонансных явлений в фотонике и актуальность данной работы, количество и цитирование работ в международных журналах по данной тематике постоянно растет.

Цель диссертационной работы Рыбина М.В. состоит в экспериментальном и теоретическом исследовании электромагнитных резонансных эффектов в фотонных кристаллах и метаматериалах, а также в отдельных элементах, образующих эти структуры.

Структура и объем диссертации.

Работа состоит из 288 листов текста, включающего в себя введение, 6 глав, заключение и список литературы из 392 наименований. По структуре и объему диссертация Рыбина М.В. соответствует требованиям Положения ВАК к оформлению диссертаций. Изложение подчинено решению основных задач.

Основные научные результаты работы и их новизна

В первой главе представлен метод обратной дисперсии расчета комплексных зонных диаграмм. Для решения ряда оптических задач необходимо проводить анализ дисперсионных ветвей, которые соответствуют модам с вещественной частотой и комплексным волновым вектором. Традиционный подход к такой задаче – численное решение трансцендентного уравнения на комплексное число. Однако при этом можно пропустить некоторые решения. Метод обратной дисперсии заключается в сведении уравнений Максвелла к задаче на собственное число некоторого оператора, зависящего от частоты. В отличие от трансцендентных уравнений, существующие итерационные методы позволяют находить все собственные решения задачи на собственные числа. Таким образом, зонные диаграммы, построенные методом обратной дисперсии, гарантированно содержат полную информацию обо всех фотонных состояниях структуры. Кроме этого, метод позволяет проводить вычисления для произвольной частотной зависимости диэлектрической проницаемости материалов. На основании метода обратной дисперсии сформулирован критерий, который позволяет отличить запрещенную зону, связанную с брэгговским рассеянием, от запрещенной зоны, связанной с локальными резонансами Ми в отдельных структурных элементах (режимы пересечения либо антипересечения дисперсионных ветвей, соответственно).

Основной результат, представленный во второй главе – формулировка концепции фотонных фазовых переходов и исследование такого перехода на примере фотонных

кристаллов и метаматериалов. Рассматривались двумерные структуры, образованные диэлектрическими цилиндрами, находящимися в узлах квадратной или треугольной решетки. На основании анализа расчетных данных, в том числе с учетом особенностей трансформации второй дисперсионной ветви, была построена фазовая диаграмма «фотонный кристалл – метаматериал». В фазе фотонного кристалла фундаментальная (самая низкая по частоте) запрещенная зона определяется брэгговским рассеянием волн на периодической структуре, а в фазе метаматериала фундаментальная запрещенная зона связана с локальными резонансами Ми в диэлектрических цилиндрах. Во второй главе представлены также результаты исследования фотонного фазового перехода в структурах, у которых диэлектрическая проницаемость цилиндров является комплексной величиной, зависящей от частоты. В этом случае критерий, основанный на особенностях второй дисперсионной ветви, не применим, поскольку в средах с поглощением на комплексных зонных диаграммах ветви переходят друг в друга, и само определение второй дисперсионной ветви не очевидно. В этом случае был использован критерий «пересечение/антипересечение» ветвей на комплексных зонных диаграммах, вычисленных методом обратной дисперсии. Было показано, что в случае непоглощающих фотонных структур оба критерия дают одинаковые результаты. Учитывая этот результат, был использован метод обратной дисперсии для построения фазовых диаграмм фотонных структур на основе кремния.

Третья глава посвящена различным электромагнитным резонансным явлениям, которые наблюдаются в режимах слабой и сильной связи. Особое внимание уделяется резонансу Фано. В спектроскопии твердого тела наблюдаются два фундаментальных контура резонансных линий – симметричный контур Лоренца и асимметричный контур Фано. Асимметричный контур Фано возникает в результате взаимодействия узкого резонанса Лоренца (состояние с малым затуханием) с широким контуром и наблюдается экспериментально при изучении самых разных объектов – от атомов гелия до полупроводников, сверхпроводников, фотонных кристаллов и метаматериалов.

В третьей главе было показано, что в случае рассеяния Ми на однородных высокоиндексных диэлектрических объектах интерференция между высокочастотной модой Ми и нерезонансным рассеянием приводит к формированию асимметричных линий в спектрах, которые описываются формулой Фано. Анализ граничных условий для гармоник, описывающих падающую плоскую волну, поле внутри однородного объекта и рассеянную волну, позволил определить резонансный и нерезонансный вклад в рассеяние. Сумма этих двух слагаемых была записана в виде формулы Фано. В последнем разделе третьей главы анализируются диаграммы направленности антенны, состоящей из излучателя и сферической частицы с диэлектрической проницаемостью (соответствует кремнию на длине волны

порядка нм). В высокоиндексной сферической частице возбуждаются магнитный и электрический дипольные резонансы M_i , в зависимости от условий их интерференции антенна формирует диаграмму направленности либо по направлению вперед, либо назад вдоль своей оси. Магнитный резонанс M_i , имеющий самую низкую частоту в спектре рассеяния частицы, играет роль узкой линии в модели резонанса Фано, причем роль широкой линии выполняет спектр излучателя и низкочастотное крыло линии электрического резонанса. В результате спектр рассеяния антенны характеризуется резонансом Фано, у которого параметр асимметрии зависит от направления излучения. Подбирая параметры антенны определенным образом, можно сформировать в диаграмме направленности выраженный лепесток в направлении вперед или назад. Экспериментально измеренные в микроволновом диапазоне диаграммы направленности такой антенны полностью совпадают с результатами расчетов.

В четвертой главе приведены примеры резонансов Фано, которые возникают благодаря структурному беспорядку. В качестве объекта исследования была выбрана классическая структура – одномерный фотонный кристалл. Беспорядок в такой структуре вводился следующим образом: толщина и диэлектрическая проницаемость слоев были постоянными величинами, а толщина и диэлектрическая проницаемость слоев флуктуировали. Флуктуации толщины слоев приводили лишь к уширению запрещенных зон в спектрах пропускания. В случае беспорядка по диэлектрической проницаемости в спектрах появлялся медленно изменяющийся фон, который соответствовал индуцированному беспорядком остаточному рассеянию Фабри-Перо на слоях. Узкие брэгговские линии становились асимметричными, при увеличении беспорядка их контура непрерывно менялись, неизменно соответствуя контуру Фано. Анализ спектров пропускания позволил определить зависимость параметра Фано от толщины слоев, нормированной на период ячейки. Появление индуцированного беспорядком резонанса Фано наблюдалось экспериментально в спектрах пропускания синтетических опалов. В эксперименте пространство между сферами заполнялось иммерсионными жидкостями с разными значениями диэлектрической проницаемости. В спектрах пропускания наблюдались все характерные формы профиля резонанса Фано.

Пятая глава посвящена резонансным эффектам, наблюдаемым в цилиндрах с высоким значением диэлектрической проницаемости. В случае диэлектрического цилиндра зануление рассеяния связано с деструктивной интерференцией между модами M_i и нерезонансной компонентой. В результате рассеяние пропадает и цилиндр становится невидимым стороннему наблюдателю без использования каких-либо специальных покрытий или устройств. В качестве цилиндра была использована горячая дистиллированная вода, залитая в длинную трубку. В спектрах рассеяния водяного цилиндра наблюдался провал

интенсивности порядка 20 дБ на частоте, соответствующей теоретическому расчету. В спектрах рассеяния цилиндров, высота которых сравнима с диаметром, помимо резонансов Ми наблюдаются дополнительные резонансы Фабри-Перо, связанные с формированием стоячей волны между плоскими торцами цилиндра. Спектральное положение резонансов Фабри-Перо существенно зависит от высоты цилиндра, в отличие от положения резонансов Ми. В пятой главе показано, что в режиме сильной связи мод Ми и Фабри-Перо добротность суперрезонансной моды достигает значения 200 в субволновом резонаторе с диэлектрической проницаемостью 13.

В шестой главе рассматриваются классические аналоги известных эффектов квантовой электродинамики – эффекта Парселла и лэмбовского сдвига, которые связаны с переходами между квантовыми уровнями из-за взаимодействия с нулевыми флуктуациями электромагнитного поля вакуума. Была исследована система, которая состоит из волновода и расположенного рядом с ним высокодобротного микрорезонатора. Волновод содержит два дефекта, которые формируют окружение, модифицирующее локальную плотность состояний вблизи микрорезонатора. Была найдена функция Грина в волноводе, которая позволила записать выражения для квантового эффекта Парселла и лэмбовского сдвига. Кроме того, было обнаружено, что скорость излучения фотонной моды микрорезонатора и ее частота зависят от сформированного двумя дефектами окружения. При этом классические формулы, полученные на основе метода матриц переноса, совпадают с формулами квантовой электродинамики, которые учитывают локальную плотность состояний нулевых колебаний вакуума. Это позволило описать эффект Парселла и лэмбовский сдвиг для фотонных мод в терминах интерференции без использования понятия локальная плотность состояний.

В Заключении перечислены основные результаты работы, все перечисленные основные результаты работы являются новыми.

Практическая значимость работы

С практической точки зрения данная работа интересна в первую очередь возможностью применения ее результатов для создания конкретных метаматериалов с требуемыми свойствами. Из построенных фазовых диаграмм «фотонный кристалл – метаматериал» можно определять структуру искусственных объектов с заданными эффективными материальными параметрами. Установлены параметры, определяющие режим невидимости однородного диэлектрического цилиндра без использования маскирующих покрытий и устройств. Обнаружены суперрезонансные моды в субволновых кремниевых цилиндрических резонаторах, которые могут быть использованы для понижения пороговых значений нелинейных эффектов, а также других приложений. Обнаружен эффект Парселла для фотонных мод, что позволяет управлять добротностью микрорезонаторов за счет

внешних элементов.

Результаты работы могут быть использованы в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе, Московском государственном университете, Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, НИЯУ МИФИ, а также Саратовском государственном университете и Ульяновском государственном университете в рамках проводимых в указанных организациях исследований, посвященных оптике микроструктур.

Несмотря на общую положительную оценку работы, можно указать некоторые **недостатки**.

Прежде всего, представление о переходе от фотонного кристалла к метаматериалу как о фазовом переходе представляется сомнительным, аналогия в данном случае весьма ограничена. Для обоснования использования термина в данной работе автор посвящает один из параграфов рассуждениям о принятой классификации и истории исследования фазовых переходов. Тем не менее, остается неясным, к какому из известных типов фазовых переходов (структурному, топологическому или какому-то другому) следует отнести рассматриваемый переход.

В главе 4 обсуждаются слоистые системы с беспорядком – флуктуациями диэлектрической проницаемости. Диэлектрические проницаемости при этом в модели берутся действительными и не обсуждается, какую роль имеет в этих эффектах играет поглощение, если включить его в рассмотрение. Представляется, что оно может заметно повлиять на результирующие спектры.

Не вполне общепринятая структура диссертации несколько затрудняет чтение. Каждая глава содержит литературные данные вперемешку с собственными, не всегда позволяя читателю легко их разделить, учитывая также ссылки под каждым рисунком на собственные работы, для определения принадлежности которых автору читателю необходимо сверяться с авторефератом диссертации, где указан полный список авторов.

Заключение

Отмеченные недостатки и сделанные замечания не затрагивают основных результатов работы. Диссертация выполнена на высоком научно-техническом уровне и представляет собой законченную научно-квалификационную работу, вносящую заметный вклад в развитие актуального научного направления, связанного с исследованием резонансных фотонных структур. Теоретические и экспериментальные результаты диссертационной работы позволяют оценить перспективность данного направления в качестве нового подхода изучения резонансных оптических материалов.

Выводы работы достаточно обоснованы.

Автореферат и публикации по теме диссертации полностью отражают ее содержание.

Диссертация полностью отвечает требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор – Рыбин Михаил Валерьевич - заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Отзыв на диссертацию подготовлен кандидатом физико-математических наук Т.В. Долговой и доктором физико-математических наук В.И. Пановым, обсужден и одобрен на семинаре кафедры квантовой электроники физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова 10 сентября 2018 г., присутствовало 19 человек, за - 19.

Зав. кафедрой квантовой электроники

д.ф.-м.н. профессор

В.И. Панов

Старший научный сотрудник

к.ф.-м.н.

Т.В. Долгова

119991 Москва ГСП-1 Ленинские горы МГУ д.1 стр.2, физический факультет, кафедра квантовой электроники, лаборатория нанооптики и метаматериалов.

тел. +7 (495) 939-39-10, +7 (495) 939-45-44

e-mail: dolgova@nanolab.phys.msu.ru

web: <http://nanolab.phys.msu.ru/>