

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Авдеевой Анастасии Юрьевны

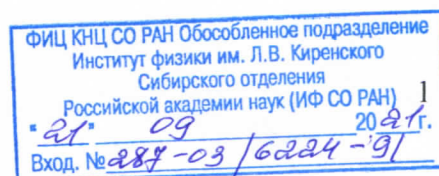
**«ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ МОДЫ В
НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛАХ С
РЕЗОНАНСНОЙ ДИСПЕРСИЕЙ»,**

представленную на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук по специальностям 1.3.6. Оптика и 1.3.8.

Физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа Авдеевой А.Ю. посвящена теоретическим исследованиям пространственных, спектральных и поляризационных характеристик оптических мод одномерных наноструктурированных фотонных кристаллов с резонансной дисперсией. Такие фотонные системы, придающие заданные пространственные, спектральные и поляризационные характеристики оптическому излучению перспективны для проектирования и изготовления принципиально новых функциональных элементов оптических устройств. В качестве наноструктурированных фотонных систем, материалов с резонансной дисперсией и сильным оптическим откликом в диссертационной работе изучены различные фотоннокристаллические структуры: одномерный фотонный кристалл с дефектным слоем нанокompозита; слоистые структуры, состоящие из металлической пленки, нанокompозита, сопряженного с фотонным кристаллом; одномерный фотонный кристалл, наполненный резонансно-поглощающим газом; структура, состоящая из анизотропного зеркала, сопряженного с холестерическим жидким кристаллом. Полученные теоретические расчеты показали возможности качественно новых способов направленного изменения спектральных и поляризационных характеристик в фотонных кристаллах, что может быть использовано в разработке широкого класса новых материалов для устройств



нанофотоники. В этой связи тема диссертационной работы Авдеевой Анастасии Юрьевны является, несомненно, **актуальной и имеет практическое значение.**

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка терминов и сокращений, списка литературы. Общий объем диссертации 111 страниц. Библиографический список содержит 176 наименований.

Во введении дана краткая характеристика работы, обоснована актуальность выбранной темы исследования, определены объекты, предмет, цели и задачи исследования. Сформулированы основные положения выносимые на защиту, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, аргументирована достоверность полученных результатов. Отмечен личный вклад автора. Приведены сведения об апробации результатов исследований.

Первая глава носит обзорный характер. В ней достаточно полно отражено современное состояние исследования фотонных кристаллов, содержащих композитные структуры с резонансной дисперсией. Детально рассмотрена концепция фотонных структур, базирующаяся на описании их физических свойств с позиций электромагнетизма и квантовой теории зонной структуры твердого тела. Рассмотрена модель эффективной среды в приближении Максвелла Гарнетта для описания оптических свойств нанокомпозитных материалов в терминах диэлектрических проницаемостей и объемных долей отдельных компонентов среды. Приведены ограничения применимости макроскопического приближения Максвелл Гарнетта на концентрацию и размер частиц композитной среды. Отдельный раздел первой главы посвящен обзору теоретических и экспериментальных работ по исследованию и экспериментальному наблюдению таммовских плазмон-поляритонов и гибридных таммовских мод, созданию на их основе принципиально нового класса оптических устройств. В заключение обзора рассмотрены возможности использования холестерических жидких кристаллов для управления оптическими свойствами фотоннокристаллических структур на их основе. Отмечено, что интерес к таким структурам обусловлен их высокой

чувствительностью к электрическим, магнитным полям и к изменению температуры.

Во второй главе приведены оригинальные результаты теоретических исследований оптических свойств одномерного фотонного кристалла с резонансным дефектным слоем металл-диэлектрического композита. Методом трансфер-матрицы вычислены коэффициенты пропускания, отражения и поглощения для рассматриваемой фотоннокристаллической структуры. Проведен анализ изменения спектральных свойств фотоннокристаллической структуры от вариации параметров среды. Впервые обнаружен эффект расщепления дефектной моды фотонного кристалла при совпадении частоты дефектной моды с резонансной частотой нанокомпозита. Установлена существенная зависимость величины расщепления от объемной доли наночастиц в матрице нанокомпозита. Дана физическая интерпретация этого эффекта. Показана возможность управления спектральным положением дефектных мод изменением угла падения света на фотоннокристаллическую структуру. Сделан вывод, что варьируемый угол падения является важным параметром для качественной перестройки спектра фотоннокристаллической структуры. Исследованы закономерности расщепления дефектной моды для волн s- и p-поляризации в зависимости от угла падения и концентрации наночастиц в матрице нанокомпозита. Определены условия, при которых в спектре пропускания появляются дополнительные полосы пропускания либо области запрещенных частот.

Третья глава посвящена результатам исследования таммовского плазмон-поляритона на границе металла и нанокомпозита, сопряженного с фотонным кристаллом. Конкретно, в приближении эффективной среды в модели Максвелл-Гарнетта рассчитаны спектральные характеристики структуры фотонного кристалла, состоящего из 25 чередующихся слоев ZrO_2 и SiO_2 с толщинами 74 нм и 50 нм, с которым сопряжен слой нанокомпозита, покрытый слоем серебра. Получено дисперсионное уравнение для таммовского плазмон-поляритона, решением которого является комплексная частота, действительная часть которой определяет положение таммовского плазмон-поляритона. Полученное решение

хорошо согласуется с результатами, полученными ранее методом трансформатрицы. Обнаружено спектральное раздвоение таммовского плазмон-поляритона в исследуемой структуре при совпадении частоты таммовского плазмон-поляритона с резонансной частотой нанокомпозита. Полученные результаты показывают существенное расширение возможности управления положением таммовских мод варьированием параметров резонансного нанокомпозитного слоя. Полученные результаты имеют практическое значение при разработке материалов для устройств нанофотоники.

В четвертой главе представлены теоретические расчеты спектров пропускания, отражения и поглощения в одномерном фотонном кристалле с дефектным слоем нанокомпозита. Дефектный слой создавался в периодической структуре фотонного кристалла, состоящего из чередующихся слоев SiO_2 и ZrO_2 , заменой центрального слоя SiO_2 на дефектный слой нанокомпозита. Расчеты показывают возможность реализации гибридных таммовских мод в такой структуре, которые проявляются в спектрах пропускания и отражения в виде расталкивающихся резонансов. Расщепление гибридных мод растет с увеличением объемной доли наночастиц в матрице нанокомпозита (рисунок 4.4 на странице 62). Показано существенное влияние на спектры отражения количества слоев в фотонном кристалле (рисунок 4.7 на странице 63). Полученные результаты открывают новые возможности в управлении световым потоком в устройствах нанофотоники на основе таммовских гибридных мод.

В пятой главе представлены результаты исследования спектральных и поляризационных свойств неограниченного одномерного фотонного кристалла, наполненного резонансно-поглощающим газом. В качестве резонансного газа рассмотрены в теоретических исследованиях пары ртути. Исследовано влияние резонансного поглощения света в такой фотоннокристаллической структуре на спектр пропускания в зависимости от угла падения света, геометрических параметров структуры и свойств резонансного газа. Проведен расчет зонной структуры объемных мод фотонного кристалла для волн р-поляризации. Показано, что сочетание дисперсии фотоннокристаллической структуры с

резонансной дисперсией газа приводит при определенных условиях к появлению дополнительной области запрещенных частот. В этой же главе рассмотрены спектральные характеристики, полученные методом трансфер-матрицы, ограниченного одномерного фотонного кристалла, состоящего из чередующихся слоев двух материалов, одним из которых является резонансно-поглощающий газ. На основании полученных результатов автором сделан вывод о перспективности таких фотоннокристаллических структур для создания спектральных призм с увеличенной дисперсией и узкополосных фильтров с управляемыми характеристиками, для разработки новых оптических устройств.

Шестая глава посвящена исследованию спектральных свойств хирального оптического таммовского состояния, локализованного на границе, сохраняющего поляризацию анизотропного зеркала и холестерического жидкого кристалла, допированного молекулами красителя. Расчет спектральных коэффициентов и распределение электромагнитного поля в образце холестерика с красителем, сопряженного с сохраняющим поляризацию анизотропным зеркалом, выполнен методом 4×4 матрицы переноса Берремана. Исследованы спектры отражения, пропускания и поглощения исследуемой структуры в зависимости от объемной концентрации молекул красителя, коэффициента затухания, шага спирали холестерика и геометрических параметров анизотропного зеркала и холестерика. Сделан вывод о том, что предложенная структура расширяет возможности эффективного управления параметрами фотонного энергетического спектра посредством изменения шага спирали изменением температуры или приложенного напряжения, что важно для разработки новых материалов для различных устройств нанофотоники.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

Анализ материала диссертационной работы и публикаций автора свидетельствует об обоснованности научных положений выносимых на защиту и **выводов**, сделанных автором по результатам исследований. Теоретическое обоснование использования различных наноструктурированных фотонных

кристаллов с резонансной дисперсией, придающих заданные пространственные, спектральные и поляризационные характеристики излучению оптического диапазона, имеет существенное значение для построения элементной базы фотоники.

Научная новизна диссертационной работы. В диссертационной работе А.Ю. Авдеевой впервые теоретически обосновано существование ряда новых эффектов в фотонных кристаллах с резонансной дисперсией, среди которых эффект расщепления дефектной моды фотонного кристалла при совпадении частоты дефектной моды с резонансной частотой нанокompозита, спектральное раздвоение таммовского плазмон-поляритона на границе металлической пленки и резонансного слоя нанокompозита, эффект расщепления хирального оптического таммовского состояния, локализованного на границе анизотропного зеркала и холестерика. Впервые показана возможность существования на границе фотонного кристалла и тонкой металлической пленки гибридных оптических мод, связанных с микрорезонаторными модами фотонного кристалла с нанокompозитным дефектом и таммовским плазмон-поляритоном.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы. Диссертационная работа Авдеевой А.Ю. имеет важное значение для более глубокого понимания оптических эффектов в фотоннокристаллических структурах на основе материалов с сильным оптическим откликом и в расширении возможностей управления спектральными характеристиками структур в результате внешнего воздействия. Полученные в работе теоретические результаты создают основу для экспериментальной реализации структур на основе фотонных кристаллов с резонансной дисперсией для разработки фотозлектронных устройств нового поколения. Предложенные в работе методы управления спектральными характеристиками фотонных кристаллов с резонансной дисперсией могут быть использованы при разработке миниатюрных лазеров, узкополосных фильтров, спектральных призм с управляемыми характеристиками.

Достоверность результатов работы обеспечена использованием корректных и широко апробированных математических моделей и методов, непротиворечивостью результатов общим физическим представлениям и подтверждается соответствием численных и аналитических расчетов.

Замечание к диссертационной работе:

Диссертационная работа не лишена некоторых недостатков:

1. Автор не обосновывает выбор методов расчета, используемый в диссертации, не указывает, использует ли автор собственную реализацию или уже существующие программные пакеты для расчета периодических структур.
2. В описании модели фотоннокристаллической структуры на странице 48 не указан состав нанокompозита.
3. Нарушена нумерация рисунков: на страницах 62 и 63 за рисунком 4.4 следует рисунок 4.7.

Но приведенные замечания не снижают общий уровень научной работы и значимость полученных результатов, которые в полной мере раскрыты в тексте самой диссертации и автореферата.

Диссертационная работа Авдеевой А.Ю. является законченным трудом, выполненным на должном научном уровне. Результаты, приведенные в работе, научно обоснованы, содержат в себе решение актуальной и практически значимой проблемы. Основные положения и результаты работы докладывались автором и получили одобрение на Международных и Всероссийских конференциях, отражены в 7 статьях в рецензируемых журналах из перечня ВАК Российской Федерации. Положения, выносимые на защиту, полностью доказаны результатами работы. Автореферат полностью и правильно отражает содержание диссертации.

Считаю, что диссертационная работа А.Ю. Авдеевой «Перестраиваемые оптические моды в наноструктурированных фотонных кристаллах с резонансной дисперсией» отвечает всем требованиям, предъявляемым ВАК к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук и соответствует «Положению о порядке присуждения учёных степеней ВАК

Российской Федерации», утвержденному постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842. Диссертация соответствует требованиям пункта 9 вышеупомянутого Положения, а ее автор АВДЕЕВА АНАСТАСИЯ ЮРЬЕВНА заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальностям 1.3.6 – Оптика и 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент

Д.ф.-м.н. (01.04.07 – физика конденсированного состояния), доцент, заведующий кафедрой технической физики Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева

Паршин Анатолий Сергеевич



Адрес: 660037, г. Красноярск, пр. имени газеты «Красноярский рабочий», 31,
Рабочий телефон: +7(391) 213-96-51
Эл. почта: aparshin2010@mail.ru

Подпись официального оппонента
А.С. Паршина удостоверяю:

Ученый секретарь Ученого совета СибГУ



А.Е. Гончаров

СПИСОК

избранных публикаций официального оппонента, д.ф.-м.н. А.С. Паршина за 2017-2021 гг. по теме диссертации А.Ю. Авдеевой «Пространственные оптические моды в наноструктурированных фотонных кристаллах с резонансной дисперсией»

1. Parshin A.S. Reflection electron energy loss spectroscopy of structures based on silicon and transition metals / A. S. Parshin, A. Yu. Igumenov, Yu. L. Mikhlin, O. P. Pchelyakov, V. S. Zhigalov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 255. – № 1. – P. 012019(7).
2. Parshin A.S. Reflection electron energy loss spectroscopy of iron monosilicide / A.S. Parshin, A. Yu. Igumenov, O. P. Pchelyakov, V. S. Zhigalov, Yu. L. Mikhlin // Russian Physics Journal. – 2017. – Vol. 59. – P. 1610-1615.
3. Андриющенко Т.А. Тонкая структура дифференциальных спектров сечения неупругого рассеяния электронов FeSi_2 / Т.А. Андриющенко, Т.Н. Хохлова, А.Ю. Игуменов, А.С. Паршин // Матер. XXI Межд. научн. конф. Решетневские чтения, Красноярск 2017. – С. 600-601.
4. Игуменов А.Ю. Разложение дифференциальных спектров сечения неупругого рассеяния электронов Si и силицида FeSi_2 на элементарные составляющие / А.Ю. Игуменов, А.С. Паршин, К.Н. Зайкова, Ю.Л. Михлин, О.П. Пчеляков, В.С. Жигалов // Материалы Российской конференции и школы молодых ученых по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники «Фотоника 2017», Новосибирск, 2017. – С. 141.
5. Igumenov A.Yu. Factor analysis of inelastic electron scattering cross section spectra of FeSi_2 / A. Yu. Igumenov, A. S. Parshin, V.O. Kanzychakova, A.M. Demin, T.A. Andryushchenko, Yu. L. Mikhlin, O. P. Pchelyakov, V. S. Zhigalov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 467. – № 1. – P. 012010(5).
6. Игуменов А.Ю. Факторный анализ спектров сечения неупругого рассеяния электронов силицида FeSi / А.Ю. Игуменов, А.С. Паршин, Т.А. Андриющенко // Сибирский журнал науки и технологий. – 2019. Т.– 20, № 1. С. 99-105.
7. Igumenov A.Y. Factor analysis inelastic electron scattering cross section spectra of Si, Fe and iron silicides FeSi_2 , Fe_5Si_3 / A. Yu. Igumenov, A. S. Parshin, T.A. Andryushchenko, Yu. L. Mikhlin, V. O. Kanzychakova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 822. – № 1. – P. 012026(6).
8. Хохлова Т.Н. Исследование спектров неупругого рассеяния электронов Al различными методами / Т.Н. Хохлова, Т.А. Андриющенко, А.С. Паршин // Матер. XXIV Межд. научн. конф. Решетневские чтения, Красноярск 2020. – С. 466-467.

9. Паршин А.С. Спектроскопия потерь энергии отраженных электронов в $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ / А.С. Паршин, Ю.Л. Михлин, Г.А. Александрова // Физика твердого тела. – 2021. – Т. 63, Вып. 8. – С. 1049-1055.

Официальный оппонент

Д.ф.-м.н. (01.04.07 – физика конденсированного состояния), доцент,
заведующий кафедрой технической физики Сибирского государственного
университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева

Паршин Анатолий Сергеевич

Адрес: 660037, г. Красноярск, пр. имени газеты «Красноярский рабочий», 31,
Рабочий телефон: +7(391) 213-96-51
Эл. почта: aparshin2010@mail.ru

Подпись официального оппонента
А.С. Паршина удостоверяю:

Ученый секретарь Ученого совета СибГУ

А.Е. Гончаров

