

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор Московского государственного
университета имени М.В. Ломоносова

профессор Федянин А.А.



«12» января 2015 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

ШИШКИНА Ивана Ивановича

на тему:

«СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОННЫХ СТРУКТУР И МЕТАМАТЕРИАЛОВ»,

представленную на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Диссертация И.И. Шишкина посвящена синтезу трехмерных фотонных структур, а также экспериментальному исследованию фотонных кристаллов синтетических опалов и гибридных структур, образованных метаматериалами и квантовыми точками. Работа состоит из трех частей, каждая из которых представляет собой законченное исследование. Основное внимание в первой части уделено описанию перспективного метода трехмерной лазерной литографии и результатам создания трехмерных фотонных кристаллов и стеклообразных фотонных материалов с новым типом структуры инвертированного яблоновита с помощью данного метода. Рассматривается актуальная задача о преимуществах и недостатках использования «векторного» и «растрового» режимов при создании фотоннокристаллических структур методом трехмерной лазерной литографии. Вторая часть посвящена экспериментальным исследованиям многоволновой брэгговской дифракции в фотонных кристаллах на основе синтетических опалов. Особое внимание уделено исследованию дифракции от неростовой системы плоскостей (-111), наблюдение которой стало возможно благодаря использованию оригинальной экспериментальной методики. В третьей части работы решается актуальная задача об электромагнитном взаимодействии квантовых точек с метаматериалом на основе разомкнутых кольцевых резонаторов. Проведены комплексные экспериментальные исследования

пространственных, спектральных и временных свойств люминесценции квантовых точек при возбуждении электрических и магнитных мод резонаторов. Полученные в этой части результаты могут внести существенный вклад в развитие методик компенсации потерь в метаматериалах с помощью активных сред. Для всех трех задач диссертационной работы проведены численные расчеты, показано хорошее соответствие экспериментальных и расчетных данных, что свидетельствует о высокой степени достоверности полученных в работе результатов.

Актуальность диссертационной работы обусловлена выбором в качестве объектов исследования трехмерных фотонных кристаллов и метаматериалов – объектов, которые позволяют различными методами управлять распространением света в широком спектральном диапазоне и поэтому рассматриваются в настоящее время как ключевые элементы будущих устройств фотоники и оптоэлектроники. Также актуальным является использование и развитие методики трехмерной лазерной литографии – единственной на сегодняшний день технологии, с помощью которой можно создавать полностью трехмерные, предварительно спроектированные на компьютере объекты практически произвольной формы с субмикронными размерами отдельных элементов.

Научная новизна результатов диссертации заключается в следующем. Впервые методом трехмерной лазерной литографии созданы кристаллы инвертированного яблонювита. Впервые методом трехмерной лазерной литографии изготовлена стеклообразная микроструктура, у которой на упорядоченный каркас наложена неупорядоченная сверхструктура.

Впервые получена полная экспериментальная картина многоволновой брэгговской дифракции света на системах плоскостей (111) и (-111) в синтетических опалах. В спектрах дифракции в пространственной области отражения от плоскостей (-111) синтетических опалов обнаружены парные пики, возникающие за счет локализации света и дополнительного рассеяния на краях фотонной стоп-зоны (111) из-за неупорядоченностей в структуре образцов опалов.

Впервые продемонстрировано взаимодействие квантовых точек с различными модами, возбуждаемыми в разомкнутых кольцевых резонаторах метаматериала в ближней инфракрасной области спектра. Обнаружено, что наибольший вклад в усиление фотолюминесценции квантовых точек вносит магнитная мультипольная мода разомкнутых кольцевых резонаторов, а не электрическая дипольная, как считалось ранее.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, двух приложений и списка цитируемой литературы, содержащего 186 наименований. Объем диссертации составляет 182 страницы, включая список литературы, 75 рисунков и 1 таблицу.

Во введении обосновывается выбор темы исследования, актуальность, научная новизна, значимость работы, формулируются **цели и задачи исследования**.

Глава 1 посвящена обзору литературы, в котором представлено описание возможностей метода трехмерной лазерной литографии, проведен обзор работ по исследованиям многоволновой брэгговской дифракции в фотонных кристаллах, а также рассмотрены свойства метаматериалов на основе разомкнутых кольцевых резонаторов и методы компенсаций потерь в метаматериалах. В конце обзора литературы приводятся задачи диссертационной работы.

Во **второй главе** описаны физические принципы, на которых основан метод трехмерной лазерной литографии. Приводится детальное описание экспериментальной установки трехмерной лазерной литографии и используемых в работе фоторезистов, излагается методика определения оптимальных параметров изготовления микрообъектов на примере микрокопии кораблика-флюгера. Описаны «растровый» и «векторный» режимы создания трехмерных субмикронных структур.

В **третьей главе** приводятся результаты изготовления трехмерных фотонных кристаллов со структурами «поленницы» и инвертированного яблонювита методом трехмерной лазерной литографии. Показана возможность создания кристаллов инвертированного яблонювита «растровым» и «векторным» методами. Представлены результаты расчета фотонных зонных структур фотонных кристаллов типа «поленницы», инвертированного яблонювита и синтетических опалов для различных параметров кристаллов и контрастов диэлектрических проницаемостей. Продемонстрирована возможность создания стеклообразных фотонных материалов методом трехмерной лазерной литографии, основу которых составляет структура инвертированного яблонювита с наложенной неупорядоченной сверхструктурой.

Четвертая глава посвящена результатам экспериментального исследования многоволновой брэгговской дифракции в фотонных кристаллах на основе синтетических опалов. В главе представлен полный набор спектров пропускания и отражения от двух систем плоскостей кристаллической решетки опалов, демонстрирующий эффект многоволновой брэгговской дифракции в таких структурах. Экспериментальные данные подтверждены теоретическими расчетами.

В **пятой главе** представлены результаты исследования электромагнитных взаимодействий квантовых точек с различными модами, возбуждаемыми в разомкнутых кольцевых резонаторах метаматериала. Приведено описание образцов структур метаматериал-квантовые точки и экспериментальных установок. Представлены результаты по измерению интенсивности, формы спектров и времени затухания

фотолюминесценции квантовых точек в зависимости от типа возбуждаемых мод в резонаторах метаматериала. Представлена аналитическая модель, описывающая взаимодействие квантовых точек с метаматериалом, продемонстрировано соответствие экспериментальных результатов модельным расчетам.

В заключении приводятся основные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы. Полученные результаты полностью соответствуют поставленным целям диссертационной работы.

Приложение 1 посвящено описанию методов расчетов фотонной зонной структуры трехмерных фотонных кристаллов и многоволновой брэгговской дифракции в опалах. В **приложении 2** представлено модельное описание люминесценции квантовых точек, взаимодействующих с разомкнутыми кольцевыми резонаторами, которое рассматривает структуру метаматериал-квантовые точки как систему связанных осцилляторов.

В качестве наиболее важных можно выделить следующие **научные результаты**: Впервые методом трехмерной лазерной литографии созданы кристаллы инвертированного яблонювита, проведены теоретические расчеты фотонной зонной структуры прямого и инвертированного яблонювита. Впервые методом трехмерной лазерной литографии изготовлена стеклообразная микроструктура, каркас которой представляет собой гранецентрированную кубическую решетку инвертированного яблонювита с неупорядоченной стеклообразной сверхструктурой.

Получен полный набор экспериментальных данных, характеризующих явление многоволновой брэгговской дифракции в фотонных кристаллах на основе синтетических опалов, который состоит из спектров пропускания и отражения от двух систем плоскостей кристаллической решетки опалов. Экспериментально и теоретически показано, что явление многоволновой брэгговской дифракции проявляется в виде эффекта антипересечения полос в спектрах пропускания, а также в картинах дифракции света на системах плоскостей (111) и (-111). В спектрах отражения от системы плоскостей (-111) обнаружены парные пики, спектральное положение которых соответствует краям полосы отражения от плоскостей (111). Эффект связан с локализацией света и дополнительным рассеянием на краях фотонных стоп-зон из-за неоднородности квазисферических кварцевых частиц, формирующих структуру опала.

Обнаружено усиление фотолюминесценции квантовых точек за счет их взаимодействия с различными модами разомкнутых кольцевых резонаторов, образующих метаматериал. Показано, что интенсивность, время затухания и форма спектров фотолюминесценции квантовых точек существенно различаются для магнитной и электрической мод

резонаторов метаматериала. Продемонстрировано, что большой вклад в усиление фотолюминесценции квантовых точек вносит магнитная мода по сравнению с электрической модой.

Значимость для науки состоит, во-первых, в демонстрации возможностей метода трехмерной лазерной литографии по созданию как упорядоченных фотонных кристаллов, так и фотонных кристаллов с неупорядоченной сверхструктурой. Во-вторых, в обнаружении принципиально нового эффекта усиления фотолюминесценции мультипольными модами разомкнутых кольцевых резонаторов, которые ранее считались слабо излучающими.

Практическое значение работы состоит в возможном использовании полученных результатов для развития методик создания фотоннокристаллических структур и устройств методом трехмерной лазерной литографии, а также для создания нового класса приборов нанофотоники на основе активных метаматериалов.

Достоверность полученных результатов определяется хорошим соответствием экспериментальных данных и теоретических расчетов, использованием современного оборудования. Результаты исследований неоднократно докладывались на специализированных международных конференциях по проблемам, связанным с тематикой диссертационной работы.

Результаты диссертации **могут быть использованы** в ФИ РАН, ИОФ РАН, МГУ, ИСАН, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, НИИ лазерной физики (ГОИ), ИФХЭ РАН и других научных институтах и центрах.

При оценке диссертационной работы следует отметить некоторые **недостатки**:

1. Оригинальные результаты четвертой главы описаны очень кратко, без упоминания важных параметров эксперимента, например, значений углов детектирования в описании спектров дифракции света, представленных на рис. 4.6 и 4.8, что существенно затрудняет восприятие материала диссертационной работы.

2. Известно, что одной из основных причин возникновения рассеяния Ми в опалах являются нарушения упорядочения структуры, что приводит к возникновению фонового рассеяния, даже если рассматривать частицы как однородные сферы (см., например, Yu. A. Vlasov, V. N. Astratov, O. Z. Karimov et al., Phys. Rev. B 55, R13 357 (1997)). На стр. 108 асимметрия в спектрах пропускания пленок опала объясняется неоднородностью диэлектрической проницаемости частиц $\alpha\text{-SiO}_2$. При этом не поясняется, что это за неоднородность, как она влияет на процесс рассеяния и какова доля рассеяния света на такой неоднородности по сравнению с рассеянием на дефектах упаковки.

3. Исследуемые в четвертой главе структуры являются пленками опалов, состоящими из 24 упорядоченных слоев микросфер диоксида кремния. При этом в работе при рассмотрении эффектов дифракции проводится описание с помощью зонной структуры, характерной для объемной среды, и не приводится обоснования допустимости такого описания в случае конечной толщины образца фотонного кристалла, который имеет место в работе.

4. Тема дифракции света в синтетических опалах, в том числе, возможность наблюдения многоволновой дифракции одновременно на различных плоскостях структуры опала, обсуждалась в большом числе работ и является достаточно известной. При этом обычно подробно обсуждается дифракция света на ростовой плоскости, подразумевая, что на родственных ей плоскостях семейства (111) все эффекты аналогичны с поправкой на угол падения. В диссертационной работе большое внимание уделяется исследованию дифракции на плоскости (-111), при этом, к сожалению, не проводится никакого сравнения результатов с ранее полученными для дифракции на плоскости (111) в схожих образцах (например, в работе А.В. Барышев, А.А. Каплянский, В.А. Кособукин и др., ФТТ 46, 1291 (2004), ФТТ 45, 434 (2003)).

5. В пятой главе исследуется усиление люминесценции квантовых точек в зависимости от типа возбуждаемой в кольцевых резонаторах моды – «электрической» или «магнитной». «Магнитной» модой в работе называется мода высокого порядка, которая характеризуется электрическим дипольным моментом, электрическим квадрупольным моментом и более слабым магнитным дипольным моментом. В обзоре литературы на странице 40 утверждается, что магнитный отклик данной моды можно возбудить при наклонном падении излучения на резонатор. Однако в пятой главе отсутствуют данные об угле падения излучения на образец в экспериментах. Более того, согласно представленным в тексте схемам экспериментов складывается впечатление, что измерения производились при нормальном падении излучения на образец метаматериала. В итоге остается не ясным, какова степень вклада магнитной составляющей «магнитной» моды в наблюдаемые эффекты? Можно ли называть такую моду «магнитной»?

Указанные выше замечания не снижают общей высокой оценки диссертации И.И. Шишкина. В целом, диссертация представляет собой серьезную законченную научно-исследовательскую работу на актуальную тему, относящуюся к одной из наиболее активно развивающихся областей физики конденсированного состояния. Полученные новые научные результаты имеют существенное значение для науки и практики. Выводы достаточно обоснованы. Автореферат диссертации правильно и полно отражает ее содержание. Диссертация и автореферат написаны понятным языком. Все используемые в

работе материалы других научных коллективов подкреплены ссылками на соответствующие статьи и книги. Результаты, вошедшие в диссертацию, опубликованы, доложены на конференциях и известны специалистам. Не вызывает сомнений, что содержание диссертации Шишкина И.И. полностью соответствует специальности 01.04.07 «физика конденсированного состояния» и удовлетворяет требованиям, представленным ВАК РФ согласно п. 7 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 30 января 2002 г. №74 (в редакции постановления Правительства Российской Федерации от 20 июня 2011 г. №475), предъявляемым к диссертациям, представленным на соискание ученой степени кандидата наук, а Шишкин Иван Иванович заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Отзыв на диссертацию и автореферат Шишкина И.И. «Синтез и исследование фотонных структур и метаматериалов» подготовлен кандидатом физико-математических наук В.О. Бессоновым и обсужден на семинаре кафедры квантовой электроники физического факультета «15» декабря 2014 года, протокол № 7.

Ведущий научный сотрудник,
кандидат физико-математических наук



В.О. Бессонов

Заведующий кафедрой квантовой электроники
физического факультета МГУ,
доктор физико-математических наук, профессор



В.И. Панов