

На правах рукописи

Филатов Владимир Викторович

СПЕКТРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В
ГЛОБУЛЯРНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛАХ

01.04.05 – Оптика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2013

Работа выполнена на кафедре физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель: **Горелик Владимир Семенович**,
доктор физико-математических наук,
профессор, Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки Физический
институт им. П.Н. Лебедева Российской
академии наук

Официальные оппоненты: **Авакянц Лев Павлович**,
доктор физико-математических наук,
профессор, Московский государственный
университет имени М.В. Ломоносова, профессор
кафедры общей физики;

Чернега Николай Владимирович,
кандидат физико-математических наук, старший
научный сотрудник, Федеральное
государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт им. П.Н. Лебедева
Российской академии наук, заведующий
лабораторией

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт общей физики
им. А.М. Прохорова Российской академии наук

Защита состоится 9 октября 2013 года в 15 часов на заседании
диссертационного совета Д.501.001.45 на базе МГУ имени М.В.
Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 5
(19 корпус НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени
М.В. Ломоносова), аудитория 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Научно-
исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан 24 июня 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д.501.001.45
кандидат физико-математических наук

О.М. Вохник

Общая характеристика работы

Актуальность исследования

Под термином «фотонные кристаллы» принято понимать оптические среды с периодическим изменением коэффициента преломления на масштабе, сопоставимом с длиной волны света видимого и ближнего инфракрасного диапазонов. В силу данной особенности энергетический спектр таких структур состоит из разрешенных и запрещенных фотонных зон. Ожидается, что фотонные кристаллы станут основой для нового поколения микроэлектроники.

Большие практические перспективы предоставляют глобулярные фотонные кристаллы (ГФК) – композиты, образованные гранецентрированной кубической (ГЦК) решеткой глобул (шаров) аморфного кварца SiO_2 диаметром от 200 до 800 нм (в зависимости от образца). Решеточные пустоты – поры – в таких кристаллах имеют размер от 50 до 150 нм соответственно. Присутствие пор позволяет вводить в опал различные включения, тем самым воздействуя на оптические свойства ГФК.

Несмотря на обилие работ, посвященных фотонным кристаллам, вопрос о создании образцов с программируемыми свойствами до сих пор не решен. Поэтому представляет большой интерес изучение закономерностей в спектрах пропускания и отражения фотонных кристаллов, выяснение условий «схлопывания» запрещенных зон (стоп-зон), анализ резонансных переходов в оптических спектрах и др.

Целью настоящей работы является экспериментальное изучение и теоретический анализ спектров электромагнитных и акустических волн в глобулярных фотонных кристаллах. В частности, предполагалась постановка новых экспериментов по выяснению особенностей спектров отражения и люминесценции вдоль направления [111] как самих опаловых матриц, так и композитов на их основе, содержащих нановключения металлического, диэлектрического и сегнетоэлектрического типов.

В качестве объектов изучения были выбраны образцы опалов с различными диаметрами глобул (от 205 до 290 нм), заполненные следующими веществами: воздухом, дистиллированной водой, водной взвесью золота, спиртовой взвесью иодида калия, водной взвесью титаната бария, а также оксидом европия (III).

Научную новизну работы составляют следующие основные положения, выносимые на защиту:

1. Одномерная модель двухкомпонентного фотонного кристалла позволяет произвести расчет законов дисперсии электромагнитных и акустических волн в реальном кристалле вдоль направления [111].

2. При введении в опал наночастиц диэлектриков происходит сдвиг запрещенных зон в длинноволновую область спектра. Заполнение пор металлическими частицами приводит к сдвигу в направлении коротких волн. При этом величина сдвига зависит от показателя преломления вводимого вещества.

3. Управление зонной структурой ГФК может быть осуществлено, путем введения в поры взвесей с изменяемой концентрацией, а также на основе электрооптического эффекта.

4. Введение редкоземельных элементов в опал позволяет реализовать резонансные фотонные кристаллы, характеризующиеся пленением фотонов вблизи краев стоп-зон.

5. В акустическом спектре опалов присутствует запрещенная зона в области нескольких гигагерц.

Научная и практическая значимость работы заключается в новых данных об особенностях распространения электромагнитных и акустических волновых полей в нанокompозитах на основе опалов, что позволяет создать оптические элементы с заданным спектральным положением запрещенной зоны. Существование аномально узких стоп-зон, а также резонансных уровней вблизи линий генерации некоторых лазеров позволяет использовать подобные фотонные кристаллы в качестве лазерных оптических резонаторов.

Присутствие запрещенных зон в гигагерцовом диапазоне акустического спектра открывает возможности использования искусственных опалов в качестве гигагерцовых звуковых генераторов.

Достоверность полученных результатов определяется согласием предсказаний теории с экспериментальными данными по спектрам отражения и фотолюминесценции, надежностью экспериментальных методов, воспроизводимостью экспериментальных данных, а также внутренней непротиворечивостью и соответствием, где это возможно, с имеющимися литературными данными.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались на Учебно-научной конференции-конкурсе по физике ФИАН, Москва, 2007; V, VI и VII Всероссийских конференциях по необратимым процессам в природе и технике, Москва, 2009, 2011, 2013; Общеуниверситетских научно-технических конференциях «Студенческая научная весна» МГТУ им. Баумана, Москва, 2009 и 2010; III Всероссийской молодежной школе-семинаре с международным участием «Инновационные аспекты фундаментальных исследований по актуальным проблемам физики», Москва, 2009; Конкурсе на лучшую научную работу молодых ученых МГТУ им. Баумана, Москва, 2011; Всероссийском молодежном конкурсе научно-исследовательских работ по фундаментальной и прикладной физике, Москва, 2012, а также семинаре кафедры физики МГТУ им. Баумана, Москва, 2013.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 8 статей в научных журналах, входящих в список ВАК, 7 работ в материалах научных конференций.

Личный вклад автора. Все представленные в диссертации оригинальные результаты получены лично автором или при его непосредственном участии.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Материал изложен на 111

страницах, содержит 57 рисунков, 10 таблиц и 117 наименований в списке литературы.

Содержание диссертации

Введение

Во введении обосновываются выбор темы диссертации и ее актуальность, описана структура диссертации и приведены основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1. Обзор исследований фотонных кристаллов

В первой главе в **разделе 1.1** рассматривается история исследований фотонных кристаллов и даются сведения о последних достижениях в области создания структур с запрещенной фотонной зоной. В **разделе 1.2** анализируются используемые на практике методы расчета зонной структуры ГФК: как полуаналитические, так и полностью численные. Акцент ставится на достоинствах и недостатках каждого из рассмотренных подходов. В **пункте 1.2.1** осуществляется детальное рассмотрение наиболее распространенного метода расчета – метода плоских волн. Указываются возможности и ограничения метода.

Глава 2. Экспериментальные исследования глобулярных фотонных кристаллов на основе искусственных опалов

Во второй главе описаны исследуемые образцы, приведена методика измерения спектров отражения и люминесценции образцов, приведена схема установки и алгоритм обработки сигнала, а также приведены сами спектры отражения и люминесценции образцов в направлении [111].

Описание образцов дается в **разделе 2.1**. В качестве объектов исследования были использованы исходные опаловые матрицы и наноккомпозиты на основе опалов, заполненные следующими веществами: H_2O , Au, C_2H_5OH , KI, $BaTiO_3$, Eu_2O_3 .

В **разделе 2.2** описывается методика измерения и обработки данных. Спектроскопические исследования проводились по схеме 180-градусной

регистрации (схема «на отражение» – Рис. 1). Свет от источника опорного излучения 1 (дейтериевой или галогенной лампы) по оптоволокну подавался на входной канал двухжильного световода, заканчивающегося зондом 2, присоединенным к кювете с образцом 3. Отраженное излучение по другому оптоволоконному каналу поступало на вход цифрового спектрометра 4, подключенного к компьютеру 5.

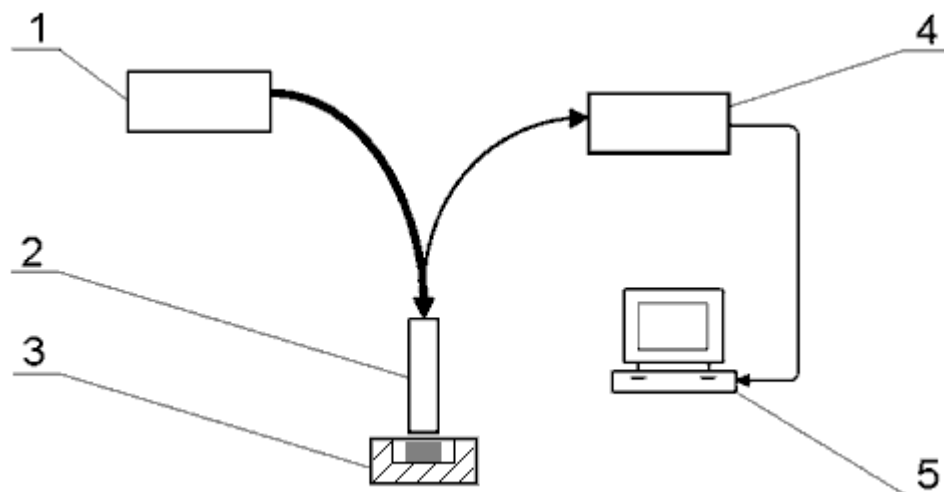


Рис. 1. Установка для регистрации спектров отражения: 1 – источник излучения, 2 – световод, 3 – кювета с образцом, 4 – спектрометр, 5 – компьютер

В силу высокой чувствительности установки спектры имели зашумленный характер, поэтому для выделения сигнала использовались специальные алгоритмы фильтрации шумов, основанные на нелинейной аппроксимации данных, встроенные в пакет численного анализа данных Origin. Для устранения паразитного фона, обусловленного неравномерной плотностью распределения излучения ламп, вклад паразитного фона был вычтен из зарегистрированного спектра. Наконец, с целью устранения погрешностей, связанных с различием времен экспозиции, итоговые спектры были нормированы на единицу.

Данные спектрального анализа образцов представлены в разделе 2.3 (см. Рис. 2 – Рис. 7).

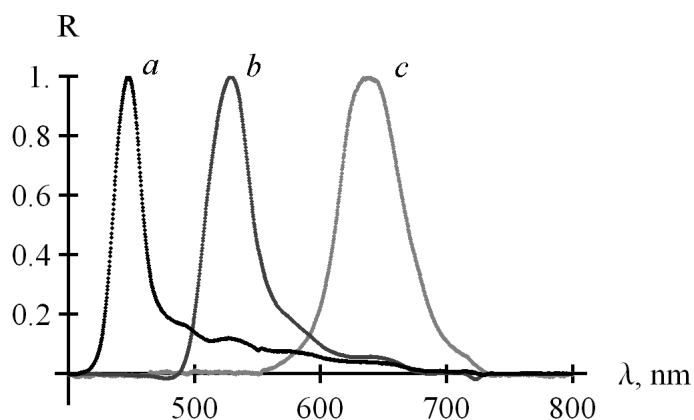


Рис. 2. Спектры отражения электромагнитного излучения от поверхности (111) исходных опалов с различными диаметрами кварцевых глобул D : (a) 205 нм, (b) 240 нм, (c) 290 нм

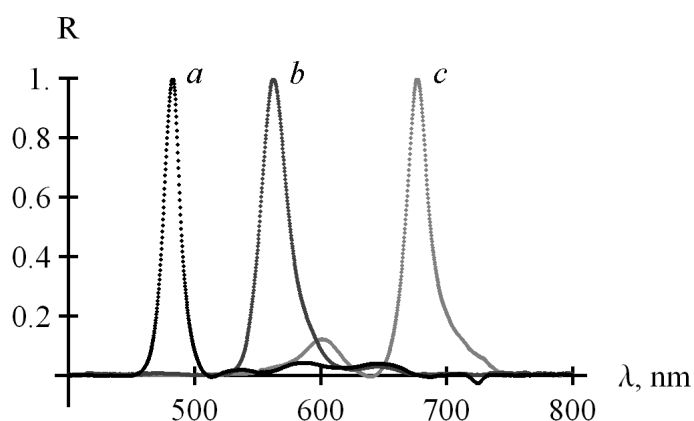


Рис. 3. Спектры отражения электромагнитного излучения от поверхности (111) опалов, заполненных водой, с различными диаметрами глобул D : (a) 205 нм, (b) 240 нм, (c) 290 нм

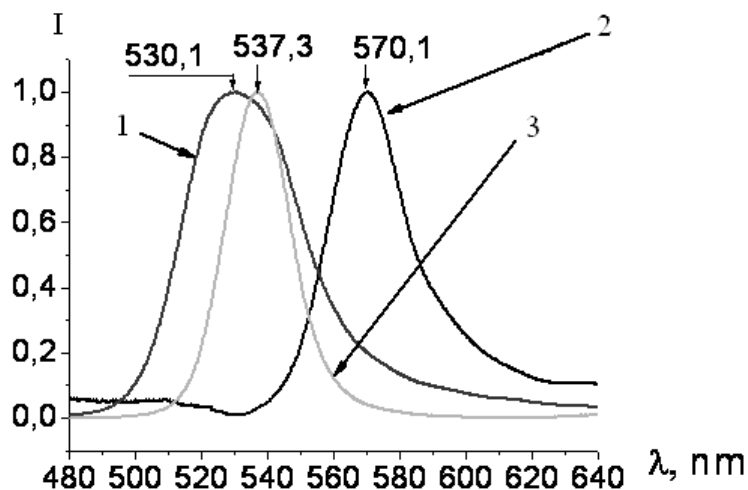


Рис. 4. Спектры отражения электромагнитного излучения от поверхности (111) опала с металлическими включениями на всех стадиях процесса легирования: (1) – спектр исходного опала; (2) – спектр образца, насыщенного водой; (3) – спектр кристалла, заполненного водной взвесью золотых наночастиц. Диаметр глобул образца $D = 250$ нм

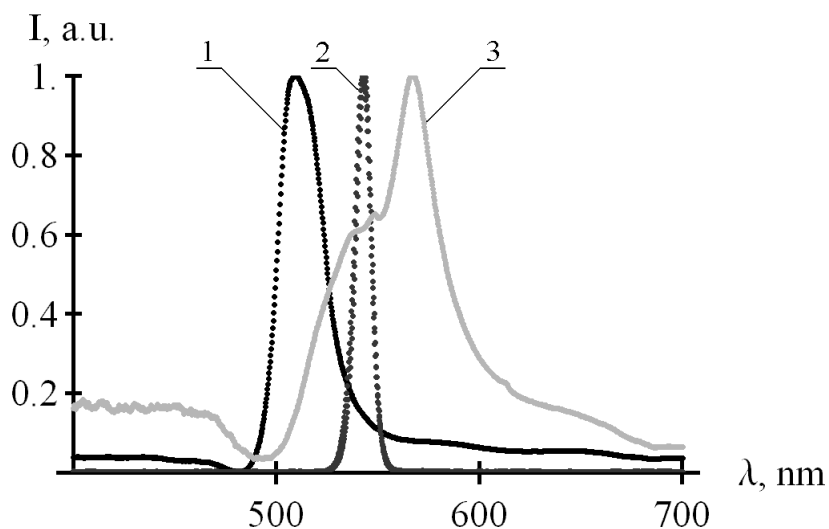


Рис. 5. Спектры отражения света от поверхности (111) ГФК со спиртовой взвесью иодида калия на всех стадиях технологического процесса: (1) исходный опал, (2) образец с C_2H_5OH , (3) кристалл, заполненный спиртовой взвесью иодида калия. Диаметр глобул образца $D = 230$ нм

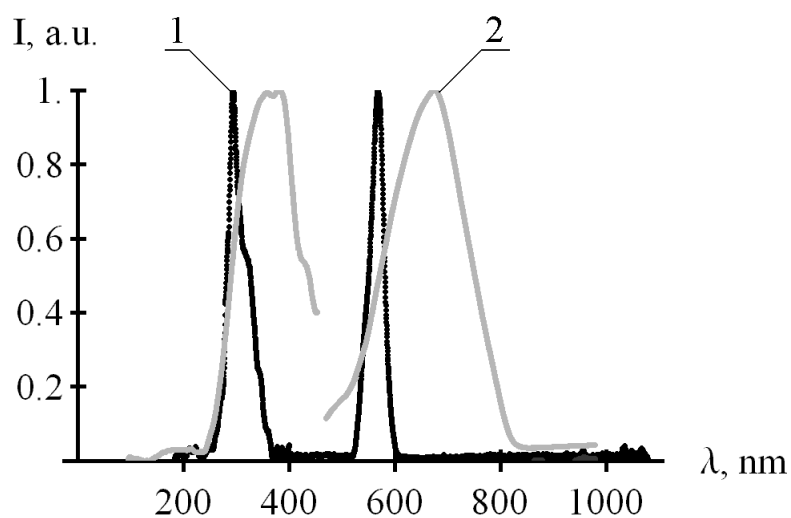


Рис. 6. Спектры отражения электромагнитного излучения от поверхности (111) ГФК с водной взвесью титаната бария: (1) опал, пропитанный дистиллированной водой, (2) кристалл, заполненный водной взвесью титаната бария. Диаметр глобул кварца в образце $D = 250$ нм

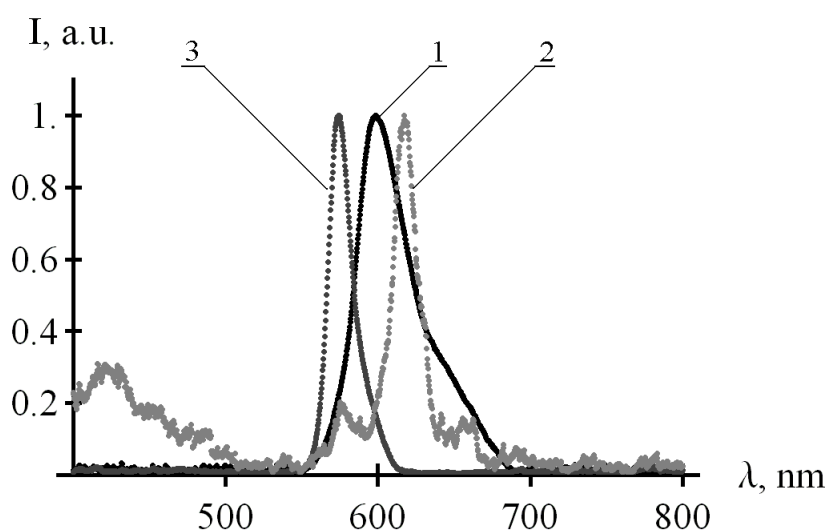


Рис. 7. Спектр отражения электромагнитного излучения от поверхности (111) исходного опала (1) и спектры люминесценции (2) и отражения (3) кристалла, заполненного Eu_2O_3 . Диаметр глобул кварца образца $D = 270$ нм

Глава 3. Теоретический анализ распространения электромагнитных и акустических волн в глобулярных фотонных кристаллах

Третья глава диссертации посвящена теоретическому исследованию распространения электромагнитных волн в глобулярных фотонных кристаллах. Здесь с позиций максвелловской электродинамики плоскостойких сред выводятся законы дисперсии электромагнитных волн в глобулярных фотонных кристаллах.

Раздел 3.1 посвящен получению дисперсионного уравнения распространения в ГФК световых и звуковых волн в рамках предложенной модели:

$$\cos k_1 a_1 \cdot \cos k_2 a_2 - \frac{1}{2} \left(\frac{n_1}{n_2} + \frac{n_2}{n_1} \right) \sin k_1 a_1 \cdot \sin k_2 a_2 = \cos ka. \quad (1)$$

Величины, входящие в (1), имеют следующий физический смысл: $i = 1$ – индекс, относящийся к SiO_2 (опаловой матрице); $i = 2$ – индекс, соответствующий веществу в порах композита; $n_1 = n_1(\omega)$ – показатель преломления кремнезема; $n_2 = n_2(\omega)$ – показатель преломления вещества, введенного в поры; η – коэффициент пористости образца; D – диаметр глобул кварца; $a = D \sqrt{2/3}$ – эффективный период ГФК в направлении $[111]$; $a_1 = (1 - \eta) \cdot a$ и $a_2 = \eta \cdot a$ – эффективные толщины слоев композита; ω_i – циклическая частота электромагнитной волны; $k_i(\omega) = \omega \cdot n_i / c$ – волновое число в i -й среде; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме. С учетом известных структурных характеристик искусственных опалов (ГЦК-решетка) коэффициент $\eta = 0,26$.

На основе полученной зависимости $k(\omega)$ в **разделе 3.2** определяются эффективный показатель преломления $n(\omega) = ck/\omega \times \text{sign}(dk/d\omega)$, спектр отражения кристалла $R(\omega) = (ck/\omega - 1)^2 / (ck/\omega + 1)^2$, групповые скорости распространяющихся в среде волн $V(\omega) = d\omega/dk$, а также эффективные массы соответствующих квазичастиц $m(\omega) = \hbar / (V \times (dV/d\omega))$

Влияние дисперсии размера глобул, затухания волн в кристалле и толщины образца на спектры отражения рассматривается в **разделах 3.3, 3.4** и **3.5** соответственно.

Глава 4. Оптические свойства фотонных кристаллов, заполненных диэлектриками или металлами

Результаты применения развитой теории для описания оптических характеристик исследуемых композитов изложены в четвертой главе. При этом анализ особенностей распространения электромагнитных волн в изучаемых образцах осуществляется с учетом резонансных зависимостей показателей преломления как самой опаловой матрицы, так и вещества, введенного в поры.

В **разделе 4.1** производится расчет зонной структуры, эффективного показателя преломления, коэффициента отражения, скорости фотонов и их эффективные массы для исходных опалов с диаметром глобул 205, 240 и 290 нм. На основе полученных данных было найдено среднеквадратичное отклонение диаметра глобул кремнезема от среднего значения. Для всех трех образцов значение СКО составило примерно 4 нм. Учет дисперсионных свойств показателя преломления кварца позволил теоретически объяснить низкочастотный резонанс в спектрах отражения образцов, наблюдаемый на длине волны около 8 мкм.

В **разделе 4.2** анализируется изменение указанных оптических характеристик образцов ГФК при заполнении опаловых пор водой. В результате расчетов было установлено сужение запрещенных зон (на величину около 50 нм) и сдвиг последних в сторону больших длин волн (на те же 50 нм). Данные результаты были полностью подтверждены экспериментально.

В **разделе 4.3** рассмотрены свойства опалов, в поры которых была введена водная взвесь наночастиц золота. Оказалось, что введение в опал металлических включений приводит к дополнительному сужению стоп-зон (еще на 20 нм) с одновременным сдвигом в коротковолновую область

спектра (на 30 нм). Расчеты были проведены с использованием модели холодной плазмы, в соответствии с которой показатель преломления введенного вещества задавался следующим образом:

$$n_2(\omega) = \sqrt{(1-C) \cdot n_{H_2O}^2 + C \cdot n_{Au}^2} \approx \sqrt{n_{H_2O}^2 + C \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}\right)} = \sqrt{n_{H_2O}^2 - \left(\frac{\tilde{\omega}_p^2}{\omega^2}\right)}.$$

Здесь C – удельная доля золота во взвеси, ω_p – плазменная частота. Эффективное значения ω_p было найдено численно при помощи итерационного метода Ньютона и составило $3 \cdot 10^{15}$ рад/с. На основании полученных данных определены законы дисперсии $\omega(k)$, $n(\lambda)$, $R(\lambda)$, $V(\lambda)$ и $m(\lambda)$ электромагнитных волн в исходном (незаполненном) опале, образце, пропитанном водой, а также фотонном кристалле с водной взвесью наночастиц золота (см. Рис. 8 – Рис. 12). Найденные значения параметров фотонов в особых точках дисперсионных кривых приведены в Табл. 1.

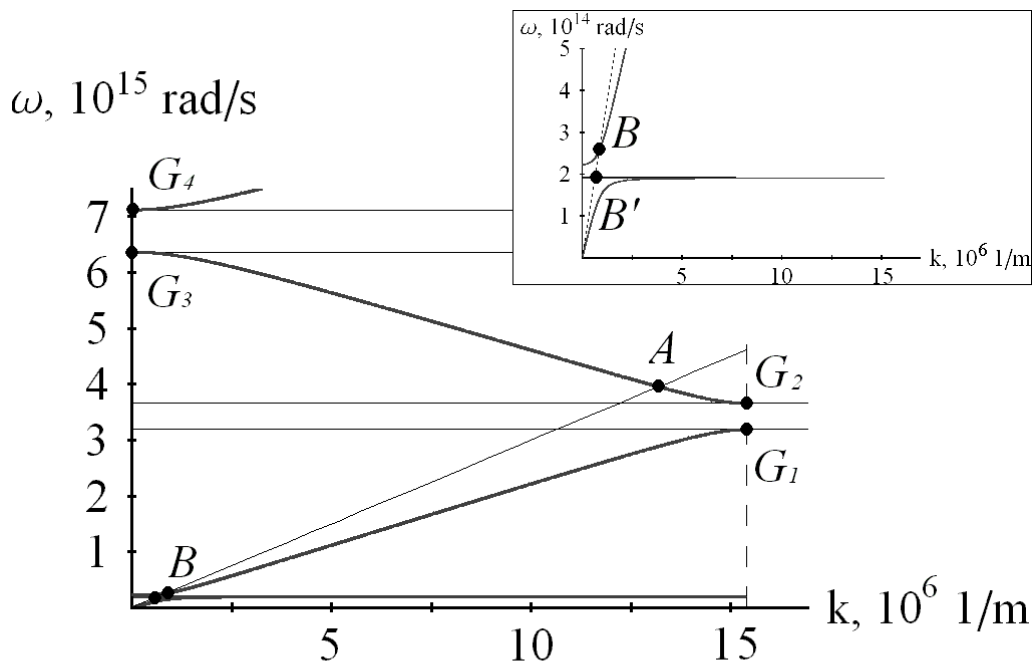
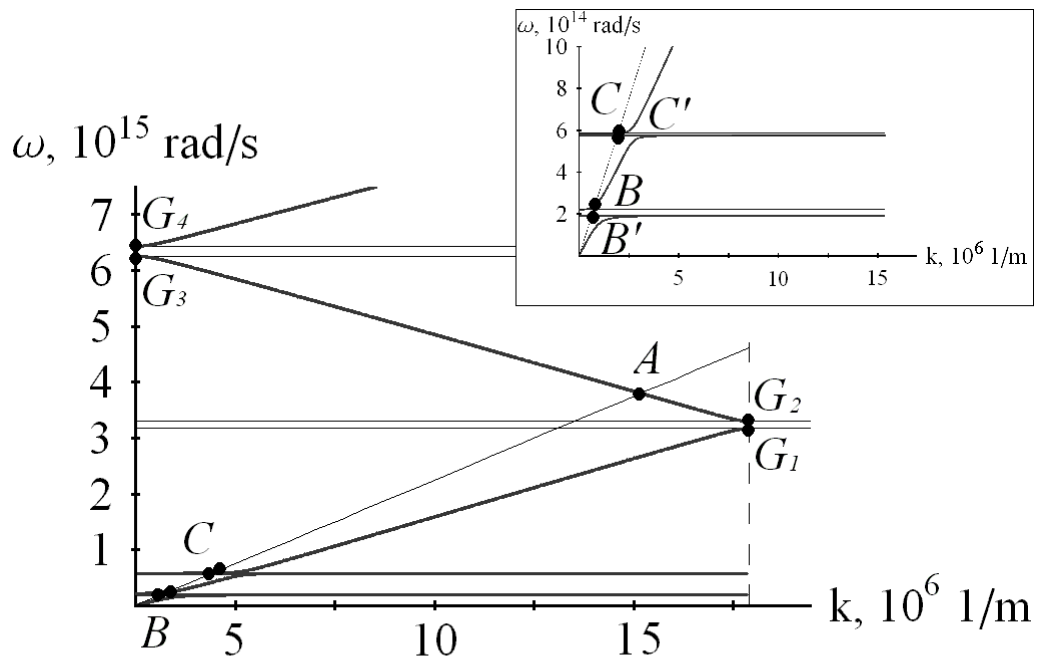
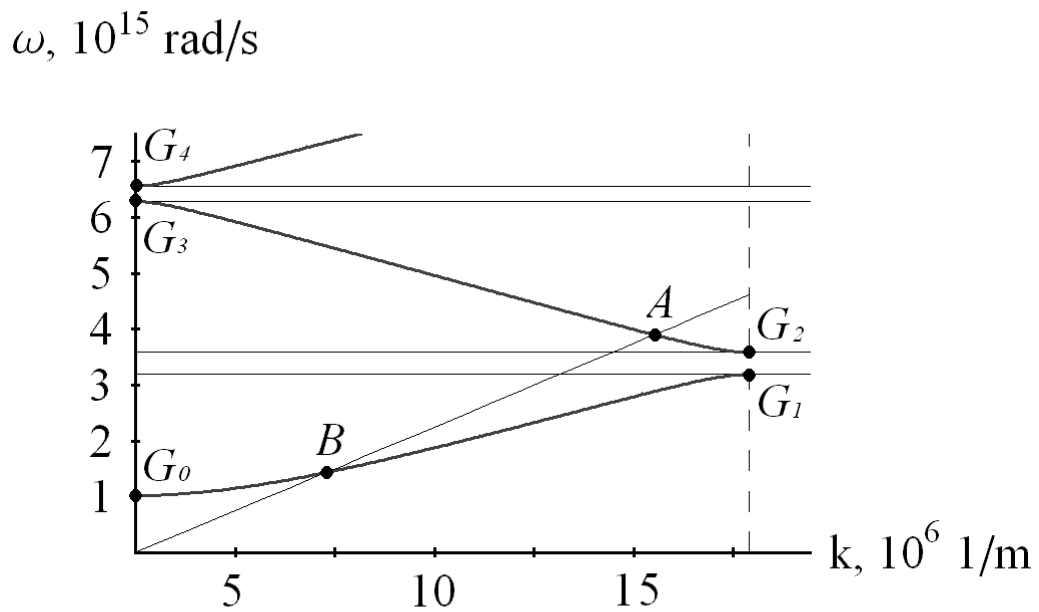


Рис. 8 а)



б)



в)

Рис. 8. Рассчитанные дисперсионные кривые для опалов с диаметром глобул $D = 250$ нм: а) исходный опал; б) образец, насыщенный водой; в) фотонный кристалл, заполненный водной взвесью золотых частиц

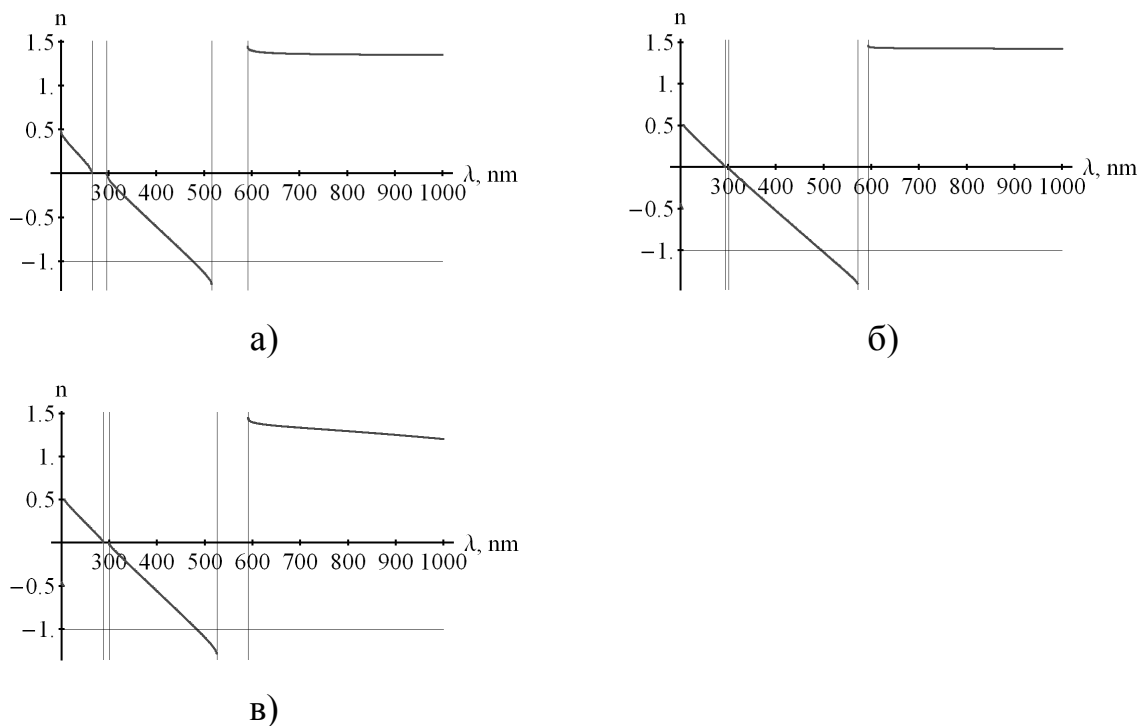


Рис. 9. Рассчитанные показатели преломления: а) исходный опал, б) образец с водой, в) ГФК с Au и H₂O. Показаны границы запрещенных зон, а также точка, соответствующая $n = -1$ (максимум прозрачности)

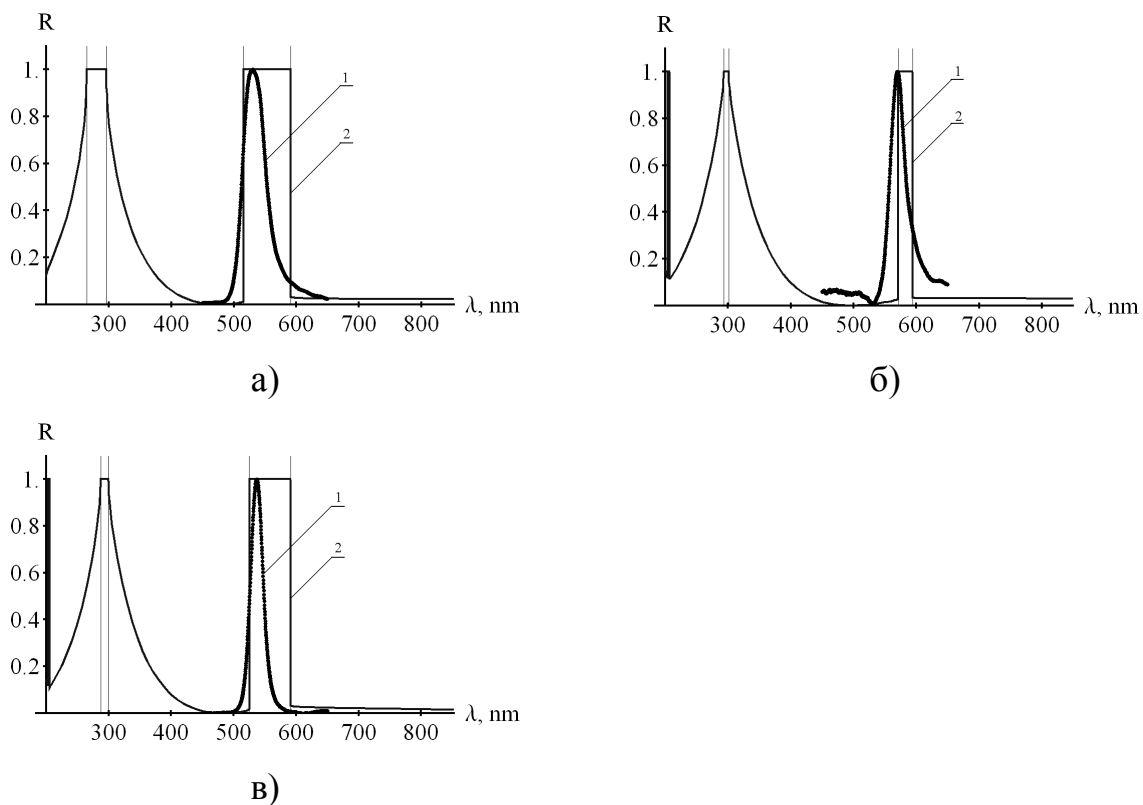


Рис. 10. Сравнение экспериментальных данных (1) и рассчитанных спектров (2): а) исходный опал, б) образец с водой, в) ГФК с Au и H₂O

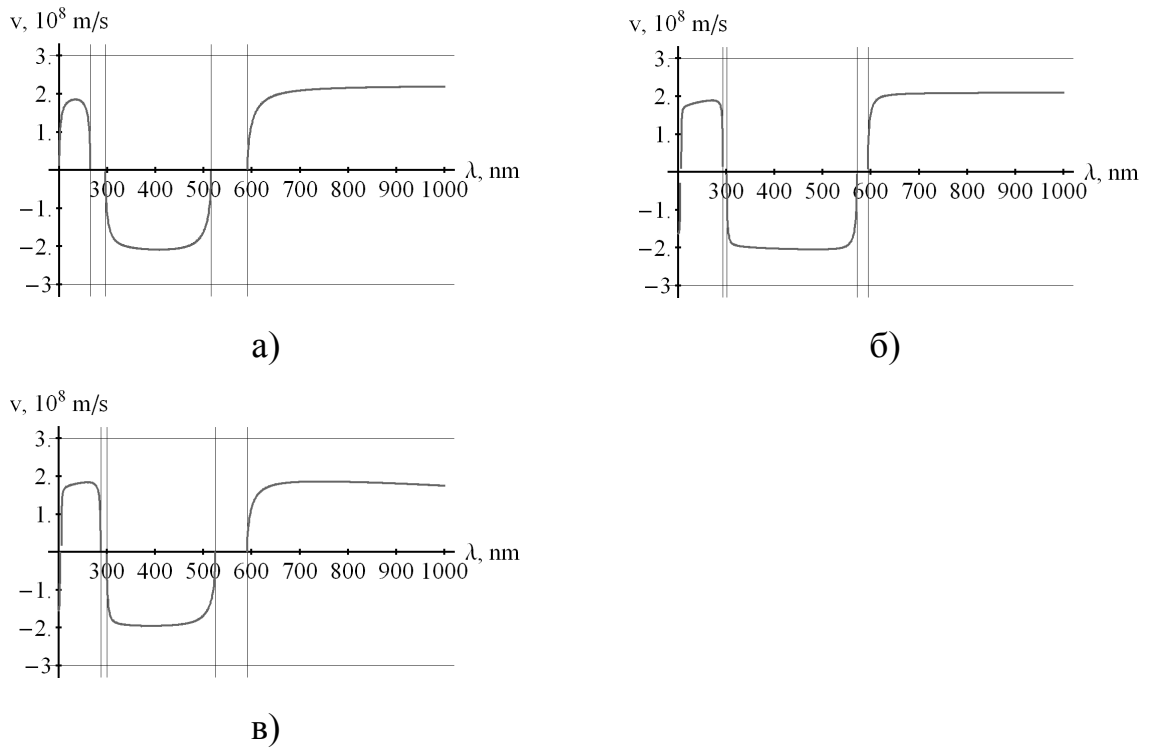


Рис. 11. Рассчитанные скорости фотонов: а) исходный опал, б) образец с водой, в) фотонный кристалл с водной взвесью золотых наночастиц

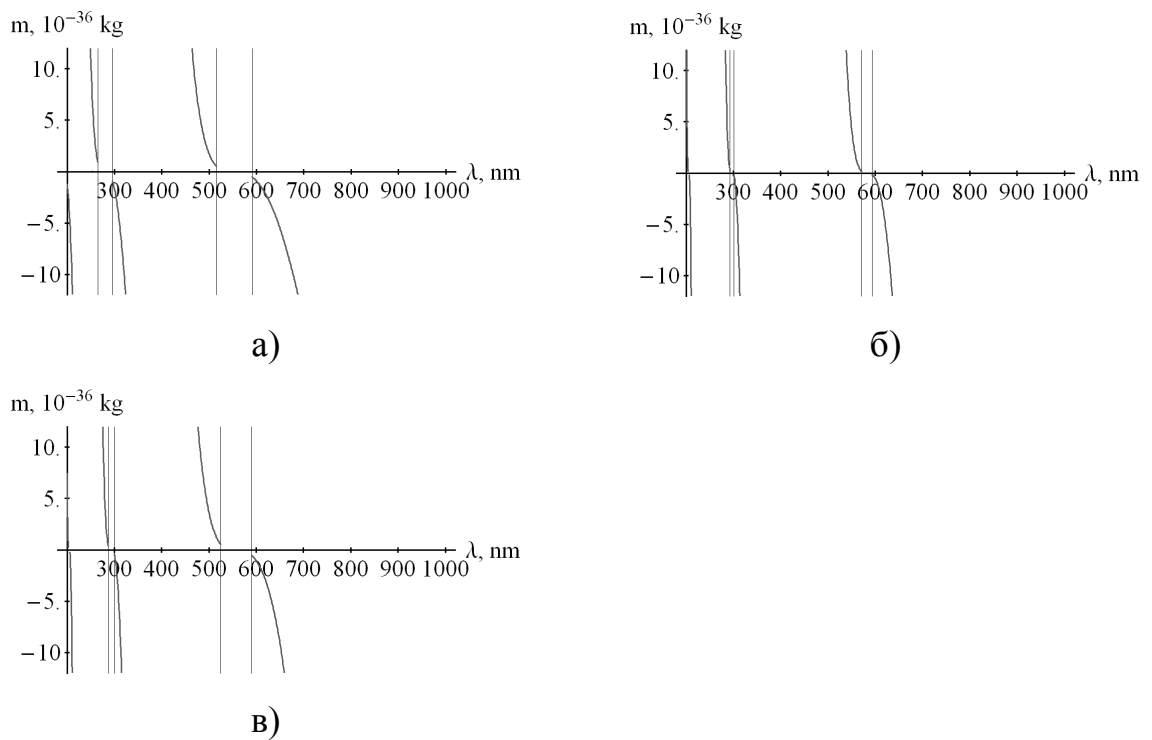


Рис. 12. Рассчитанная эффективная масса фотонов: а) исходный опал, б) образец с водой, в) кристалл, заполненный водной взвесью Au

Табл. 1. Параметры электромагнитных волн в различных точках зоны Бриллюэна для искусственных опалов с диаметром глобул $D = 250\text{нм}$

Точка	$\omega, 10^{15}$ рад/с	$\lambda, \text{нм}$	n	R	$v, 10^8$ м/с	$m, 10^{-37}$ кг
Исходный (незаполненный) опал						
A	3,9	480	-1,0	0,0	-1,9	66
B	0,3	7400	1,0	0,0	1,1	4,8
G ₁	3,2	590	∞	1,0	0,0	-5,1
G ₂	3,7	520	$-\infty$	1,0	0,0	5,2
G ₃	6,4	300	0,0	1,0	0,0	-9,3
G ₄	7,1	270	0,0	1,0	0,0	9,6
Опал, насыщенный водой						
A	3,8	500	-1,0	0,0	-2,0	3300
B	0,2	7800	1,0	0,0	0,8	5,4
C	0,6	3200	1,0	0,0	0,09	45
G ₁	3,2	590	∞	1,0	0,0	-1,5
G ₂	3,3	570	$-\infty$	1,0	0,0	1,5
G ₃	6,3	300	0,0	1,0	0,0	-2,4
G ₄	6,4	290	0,0	1,0	0,0	2,4
Опал с водной взвесью наночастиц Au						
A	3,9	480	-1,0	0,0	-1,9	89
C	1,4	1300	1,0	0,0	1,5	68
G ₀	1,0	1800	0,0	1,0	0,0	24
G ₁	3,2	590	∞	1,0	0,0	-5,4
G ₂	3,6	530	$-\infty$	1,0	0,0	5,4
G ₃	6,3	300	0,0	1,0	0,0	-4,0
G ₄	6,6	290	0,0	1,0	0,0	4,0

В разделе 4.4 исследуются образцы опалов, заполненные спиртовой взвесью иодида калия. В процессе моделирования зонной структуры спектра образцов установлено аномальное сужение ($\Delta\lambda < 1$ нм) первой (низкочастотной) запрещенной зоны при объемной концентрации взвеси $C = 30\%$. Это связано с тем фактом, что при указанном значении концентрации $n_1 = n_2$ и слоистая среда становится близкой к оптически однородной. На основе полученных результатов производится определение диаметров глобул опалов, соответствующих аномально узкой стоп-зоне на длине волны генерации некоторых лазеров.

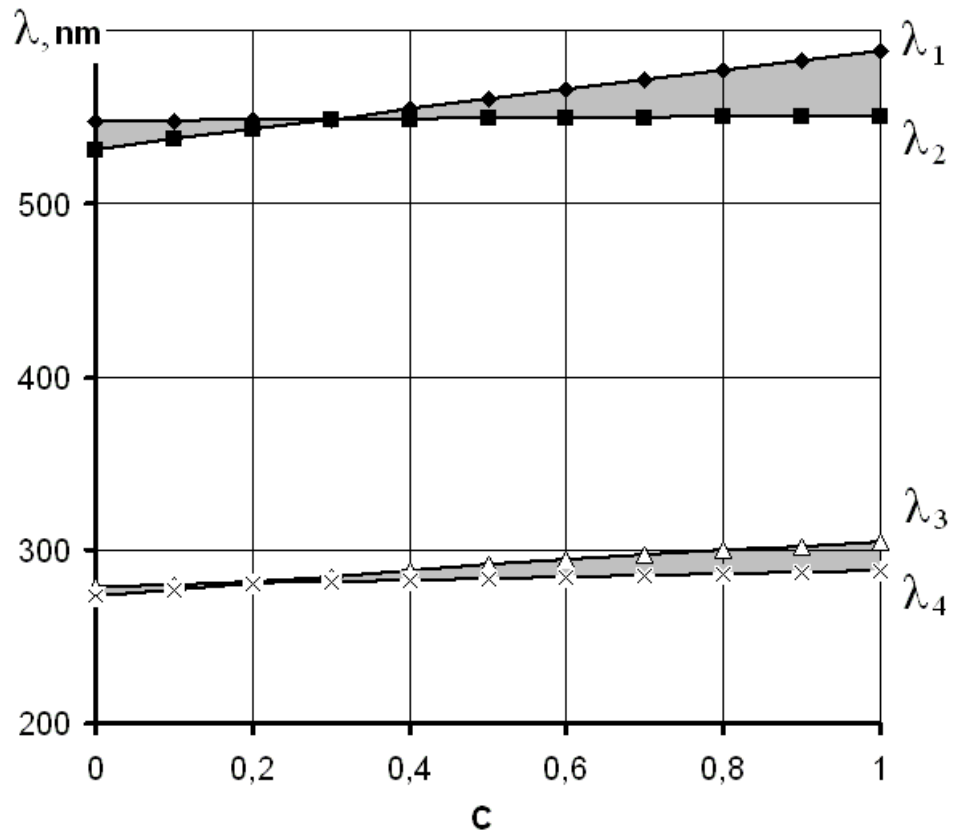


Рис. 13. Положение краев первой (λ_1 и λ_2) и второй (λ_3 и λ_4) стоп-зон в зависимости от концентрации C спиртовой взвеси КІ в опалах с диаметром глобул $D = 230$ нм. Запрещенные зоны закрашены

В разделе 4.5 изучаются оптические свойства опалов с титанатом бария. Как оказалось, введение сегнетоэлектрика в опал приводит к формированию необычно широких стоп-зон (около 300 нм). При этом также отмечается наибольший сдвиг пиков отражения (около 100 нм) в длинноволновую область. Кроме того, введение сегнетоэлектрического материала в опал интересно с точки зрения управления оптическими свойствами композита при помощи внешнего электромагнитного воздействия. В пункте 4.5.1 анализируются линейный и квадратичный электрооптические эффекты в опале, заполненном водной взвесью титаната бария.

Табл. 2. Влияние электрического поля на положение запрещенных зон в опалах с включениями титаната бария (диаметр глобул кварца $D = 230$ нм)

Сингония BaTiO ₃	Напряженность внешнего поля E , кВ/м	Первая запрещенная зона		Вторая запрещенная зона	
		λ_1 , нм	λ_2 , нм	λ_3 , нм	λ_4 , нм
тетрагональная	1	782,1	608,3	382,1	346,8
	10	782,1	608,3	382,1	346,8
	100	782,1	608,3	382,1	346,7
	1 000	782,0	608,3	382,1	346,7
	10 000	780,7	608,2	381,7	346,3
кубическая	1	782,1	608,3	382,1	346,8
	10	782,1	608,3	382,1	346,8
	100	782,1	608,3	382,1	346,7
	1 000	778,8	608,1	381,1	345,7
	10 000	589,7	487,5	284,1	294,3

Наконец, **раздел 4.6** диссертации посвящен рассмотрению свойств резонансных фотонных кристаллов на примере опала, заполненного оксидом европия Eu₂O₃. Введение в образец редкоземельных элементов приводит к расщеплению стоп-зоны. При этом фотоны резонансного уровня (615 нм) имеют крайне малую скорость и в то же время ненулевую массу. То есть, на резонансной частоте реализуется бозе-эйнштейновская конденсация фотонов. При этом спектральное положение резонанса (615 нм) и его ширина (25 нм) открывают возможности для использования фотонных кристаллов с редкоземельными включениями в оптических резонаторах гелий-неоновых лазеров с рабочей длиной волны 611,8 нм.

Глава 5. Акустические свойства искусственных опалов. Фононные кристаллы

Исследованию дисперсии акустических волн в опалах посвящена пятая глава диссертации. В процессе исследования установлено, что, во-первых, в спектре акустических фононов в фотонном кристалле присутствуют запрещенные и разрешенные зоны в области нескольких гигагерц. Во-вторых, групповые скорости акустических волн вблизи краев запрещенных фононных зон резко уменьшаются. В-третьих, эффективная масса

акустических фононов, соответствующих замедленным акустическим волнам, принимает аномально низкие значения и становится сравнимой с массой электрона.

Таким образом, глобулярные фотонные кристаллы могут быть отнесены к фононным кристаллам и могут быть использованы для генерации направленного монохроматического акустического излучения, частота которого находится в гигагерцовом диапазоне и зависит от параметров искусственного опала, а также от типа вещества, вводимого в поры глобулярного фотонного кристалла.

Основные результаты работы

В данном разделе сформулированы основные результаты исследований, выполненных в данной диссертационной работе:

1. Обнаружено, что заполнение пор искусственных опалов материалами диэлектрического типа (H_2O , $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, KI , BaTiO_3) приводит к спектральному сдвигу полос отражения в длинноволновую область. При легировании металлическими частицами (Au) наблюдается сдвиг в направлении коротких длин волн. Введение в опал оксидов редкоземельных элементов (Eu_2O_3) вызывает расщепление стоп-зоны. При этом во всех случаях наблюдается изменение спектральной ширины полос отражения электромагнитного излучения от поверхности (111) кристаллов.
2. Разработана теория распространения электромагнитных волн вдоль направления [111] для глобулярных фотонных кристаллов с различными включениями с учетом дисперсионных свойств как самой опаловой матрицы, так и легирующего агента.
3. Разработана теория акустических свойств фотонных кристаллов, предсказывающая наличие запрещенных зон в области нескольких гигагерц.
4. Определены дисперсионные зависимости оптических свойств различных типов ГФК: дисперсионные кривые $\omega(k)$, показатели преломления $n(\omega)$, спектры отражения $R(\omega)$, групповые скорости фотонов $V(\omega)$ и их эффективные массы $m(\omega)$.

5. Предложен способ контроля качества решетки фотонного кристалла по спектрам отражения на основе среднеквадратичного отклонения периода решетки σ .
6. Показана возможность управления зонной структурой опалов посредством варьирования концентрации введенного в поры вещества, что позволяет использовать ГФК в качестве фоторефрактивных сенсоров.
7. Определено влияние электрооптических эффектов на зонную структуру фотонного кристалла с титанатом бария.
8. Теоретически предсказано и экспериментально подтверждено расщепление запрещенной зоны в резонансных ГФК с Eu_2O_3 .

Заключение

В **заключении** подведены итоги проведенных изысканий, описаны потенциальные практические применения глобулярных фотонных кристаллов на основе искусственных опалов, а также приведены сведения об объеме и перспективах роста рынка оптических элементов на фотонных кристаллах.

Список публикаций по теме диссертации

- A1. Горелик В.С., Филатов В.В. Глобулярные фотонные кристаллы, заполненные ртутью // Учебно-научная конференция-конкурс по физике: Тезисы докладов. М.: ФИАН, 2007. С. 56-57.
- A2. Войнов Ю.П., Горелик В.С., Злобина Л.И., Филатов В.В. Спектры отражения видимого излучения от поверхности опалов, заполненных золотом или серебром // Необратимые процессы в природе и технике: Труды пятой всероссийской конференции 26–28 января 2009 г. В 3-х частях. Часть III – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. С. 17-20.
- A3. Филатов В.В. Оптические характеристики глобулярных фотонных кристаллов, заполненных золотом // Студенческий научный вестник. Сборник тезисов докладов общеуниверситетской научно-технической конференции «Студенческая научная весна-2009». 23 марта – 30 апреля

2009г., МГТУ им. Н.Э. Баумана / Под. Ред. К.Е. Демикова. М.: НТА «АПФН», 2009. (Сер. Профессионал). Т.8. Часть 2. С. 181-182.

А4. Филатов В.В., Горелик В.С. Закон дисперсии акустических волн в фононных кристаллах, заполненных диэлектриком или металлом // III Всероссийская молодежная школа-семинар с международным участием «Инновационные аспекты фундаментальных исследований по актуальным проблемам физики» 25–30 октября 2009г.: Программа, аннотации докладов. М.: ФИАН, 2009. С. 57-58.

А5. Филатов В.В. Параметры запрещенной зоны для акустических волн в глобулярных фотонных кристаллах, заполненных диэлектриком или металлом // Студенческий научный вестник. Сборник тезисов докладов общеуниверситетская научно-техническая конференция «Студенческая научная весна-2010». 1 - 30 апреля 2010 г., МГТУ им. Н.Э. Баумана / Под ред. К.Е. Демикова. М.: НТА «АПФН», 2010. (Сер. Профессионал). Т. 10. Часть 1. С. 279-280.

А6. Горелик В.С., Филатов В.В. Дисперсионные свойства искусственных опалов, заполненных наночастицами золота // Необратимые процессы в природе и технике: Труды шестой всероссийской конференции 26–28 января 2011 г. (В трех частях) Ч.III. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. С. 63-66.

А7. Горелик В.С., Филатов В.В. Спектры отражения резонансных фотонных кристаллов, заполненных оксидом европия // Необратимые процессы в природе и технике: труды Седьмой всероссийской конференции 29-31 января 2013 г. (В трех частях) Ч.III. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. С.68-71.

А8. Войнов Ю.П., Горелик В.С., Злобина Л.И., Филатов В.В. Спектры отражения опалов с порами, заполненными золотом или серебром // Неорганические материалы. 2009. Т. 45, №10. С. 1211-1216.

А9. Филатов В.В., Горелик В.С. Закон дисперсии акустических волн в фононных кристаллах, заполненных диэлектриком или металлом // Краткие сообщения по физике. 2010. №2. С.42-44.

- A10. Bunkin N.F., Gorelik V.S. and Filatov V.V. Acoustic properties of globular photonic crystals based on synthetic opals // *Physics of Wave Phenomena*. 2010. Vol. 18(2). pp. 90–95.
- A11. Горелик В.С., Филатов В.В. Дисперсионные характеристики глобулярных фотонных кристаллов, заполненных водой и золотом // *Неорганические материалы*. 2012. Т. 48, №4. С. 429-436.
- A12. Горелик В.С., Филатов В.В. Спектроскопия стоп-зон в искусственных опалах, заполненных спиртовым раствором йодистого калия // *Оптика и спектроскопия*. 2012. Т. 113, №3. С. 301-305.
- A13. Горелик В.С., Филатов В.В. Спектроскопия стоп-зон глобулярных фотонных кристаллов, заполненных водой // *Краткие сообщения по физике*. 2012. Т.39, №11. С. 13-24.
- A14. Филатов В.В. Управляемые оптические свойства глобулярных фотонных кристаллов на основе искусственных опалов, легированных сегнетоэлектриком // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Естественные науки»*. 2012. Специальный выпуск №6 «Математическое моделирование в технике». С. 212-227.
- A15. Горелик В.С., Филатов В.В. Оптические свойства фотонных кристаллов, заполненных редкоземельными элементами// *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Естественные науки»*. 2012. Специальный выпуск №5 «Необратимые процессы в природе и технике». С. 104-111.

Подписано к печати 24.05.13. Заказ № 369

Тираж 100 экз.

Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5

(499) 263-62-01