

На правах рукописи
УДК 539.216:535.3



Яников Михаил Владимирович

**ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ
И ГИБРИДНЫХ МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУР
НА ОСНОВЕ ОПАЛОВ**

Специальность: 01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Псков
2016

Работа выполнена на кафедре физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Псковский государственный университет» (ПсковГУ).

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор **Владимир Гаевич Соловьев**, заведующий кафедрой физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Псковский государственный университет».

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор кафедры физической электроники Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена» (РГПУ им. А.И. Герцена) **Вачаган Тигранович Аванесян**,

доктор физико-математических наук, профессор кафедры оптоинформационных технологий и материалов Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики» (Университет ИТМО) **Александр Иванович Сидоров**.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук» (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН).

Защита диссертации состоится «**20**» мая **2016** г. в **15** час. **30** мин. на заседании диссертационного совета Д. **212.190.06** при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Петрозаводский государственный университет» по адресу: 185910, г. Петрозаводск, пр. Ленина 33, ауд. **221**.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет» и на сайте <http://dssp.petrso.ru/ds/index.php/candidats/33-janikov>

Автореферат разослан « _____ » _____ **2016** г.

Учёный секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук, доцент



Пикулев В.Б.

Актуальность проблемы.

Возникший в последние два десятилетия повышенный интерес со стороны научного сообщества к исследованию физических свойств фотонных кристаллов (ФК), а также гибридных структур на их основе, не случаен. Под ФК понимают особый класс оптических материалов, обладающих пространственной периодичностью показателя преломления (ПП) [1-3]. Следствием указанной особенности является возникновение запрещённых энергетических состояний для света с длиной волны, сопоставимой с периодом структуры, называемых фотонными запрещёнными зонами (ФЗЗ), что экспериментально проявляется в возникновении максимумов в спектрах отражения и коррелирующих с ними минимумов в спектрах пропускания.

Возможность гибкого варьирования положением и шириной ФЗЗ в зависимости от используемого материала и геометрии структуры позволяет найти для ФК широкую область практического применения для изготовления устройств, управляющих потоками электромагнитного (ЭМ) излучения. Также проводятся исследования по изучению возможностей использования ФК как альтернативы полупроводниковых электронных компонентов, являющихся основой элементной базы вычислительных и запоминающих устройств. Таким образом, перспективы широты использования и актуальность проведения узконаправленных научных исследований позволили выделить ФК в качестве отдельных объектов изучения и образовать новый раздел физики – фотонику.

Одна из приоритетных задач фотоники заключается в построении оптических систем, обеспечивающих возникновение запрещённых состояний вне зависимости от направления падающего излучения. Указанному условию наиболее полно отвечают структуры с максимальной размерностью модуляции показателя преломления – трёхмерные ФК. В роли трёхмерных ФК могут выступать синтетические опалы, которые состоят из одинаковых по размеру субмикронных сфер, образующих гранецентрированную кубическую (ГЦК) решётку.

Поскольку фотонно-энергетическая структура (ФЭС) опала определяется особенностями строения кристалла, необходимым условием расширения функциональных возможностей образца по управлению потоками ЭМ излучения является её модификация. Диспергирование различных веществ в регулярной системе полостей опаловых матриц позволяет осуществлять модификацию ФЭС вследствие изменения функции распределения показателей преломления входящих в состав образца компонент. Величина наблюдаемого при этом смещения энергетического положения ФЗЗ физически ограничена предельным значением показателя преломления вещества-гостя.

Модификацию ФЭС образца возможно также осуществить путём гибридизации собственных фотонных мод опала с волнами рассеяния на дефектах кристалла или возбуждёнными в наночастицах металлического наполнителя плазмонными резонансами.

Альтернативным вариантом построения гибридных систем является создание металлодиэлектрических плазмонно-фотонных гетерокристаллов (ПФГК), состоящих из различных комбинаций слоёв коллоидных ФК в контакте с тонкопленочными плазмонными кристаллами [4]. В этом случае функциональные возможности управления потоками ЭМ излучения значительно расширяются благодаря дополнительным эффектам переноса энергии вдоль границы металл-диэлектрик за счёт поверхностных плазмон-поляритонов (ППП). Практическая реализация подобных структур возможна в случае, если морфология связного металлического покрытия отвечает решётке исходного ФК.

Одним из основных методов исследования структуры и оптических свойств ФК на основе опалов является метод брэгговской спектроскопии, информативность которого по ряду причин существенно уменьшается при больших углах падения света на образец. Поэтому разработка экспериментальных методик исследования именно для указанного диапазона углов имеет особую актуальность.

Целью данной работы являлось установление закономерностей оптических явлений фотонных кристаллов и гибридных металлодиэлектрических структур на основе опалов.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Проведение теоретического анализа на предмет определения необходимых условий построения композитных систем на основе ФК, обеспечивающих существенное изменение его исходной фотонно-энергетической структуры.

2. Получение новых нанокпозиционных материалов, обладающих свойствами ФК, путём введения наночастиц различной природы в исходную матрицу опала.

3. Экспериментальное изучение возможностей практической реализации гибридных плазмонно-фотонных систем.

4. Расширение арсенала методических средств, используемых для исследования структуры и оптических свойств ФК на основе опалов.

5. Экспериментальное исследование закономерностей распространения электромагнитного излучения в фотонных и гибридных металлодиэлектрических плазмонно-фотонных кристаллах на основе опалов.

6. Развитие модельных представлений о распространении света в гибридных оптических системах на основе ФК.

Достоверность и обоснованность полученных результатов и выводов обеспечивались комплексным характером исследования, корректностью использованных экспериментальных методик и воспроизводимостью результатов измерений, применением современных методов математической обработки экспериментальных данных на ЭВМ, сопоставлением с литературными данными по проблеме исследования, опорой на современные физические представления, соответствием экспериментальных результатов модельным представлениям.

Научная новизна результатов исследования заключается в следующем.

В работе на основе опаловой матрицы посредством адсорбции йода из паров получен новый нанокпозиционный материал I / опал и проведено исследование его оптических свойств. Осуществлѐн синтез нанокпозиционного типа Ag / опал с использованием метода электротермодиффузии.

Автором диссертации экспериментально показана возможность использования для определения оптических свойств фотонно-кристаллических структур наряду с методом брэгговской спектроскопии метода спектральной эллипсометрии.

В результате проведенных в работе экспериментальных исследований физических явлений установлен ряд новых закономерностей:

- корреляция спектральных зависимостей эллипсометрического параметра $\Psi(\lambda)$ и спектров брэгговского отражения $R(\lambda)$ фотонных кристаллов на основе опалов, а также сдвиг максимумов в спектрах обоих типов в «синюю» область при увеличении угла падения света;

- на примере образцов Ag / опал для нанокпозиционных материалов, полученных путѐм заполнения веществом исходной матрицы, установлена возможность существенной модификации ФЭС опала, проявлением которой является асимметрия профиля резонансных полос в спектрах отражения $R(\lambda)$;

- полученная асимметричная форма профиля резонансных полос в спектрах отражения нанокпозиционного Ag / опал может быть объяснена резонансом Фано, возникающим при взаимодействии фотонных мод с рассеянным на металлических наночастицах широкополосным излучением.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Спектральная эллипсометрия позволяет определять положения запрещенных зон в фотонных кристаллах на основе опалов, дополняя при больших углах падения света стандартные методы брэгговской спектроскопии, что подтверждается результатами экспериментальных исследований системы наночастиц йода в опаловой матрице.

2. Существует возможность создания гибридных плазмонно-фотонных гетероструктур, морфология металлических покрытий в которых обладает пространственной периодичностью исходного фотонного кристалла.

3. Нанесение связанных металлических покрытий на поверхность опала вызывает перестройку фотонно-энергетической структуры образца, что может быть вызвано гибридизацией электромагнитных мод поверхностных плазмон-поляритонов с собственными модами фотонного кристалла.

4. Введение серебра в матрицу опала методом электротермодиффузии модифицирует фотонно-энергетическую структуру полученного гибридного металлodieлектрического образца, что может быть интерпретировано как проявление резонанса Фано.

Теоретическая значимость работы определяется тем, что автором получен обширный экспериментальный материал для теоретического обобщения физических свойств фотонных и гибридных

металлодиэлектрических плазмонно-фотонных кристаллов на основе опалов. Установленная возможность изменения энергетической структуры ФК путём введения металлических наночастиц методом электротермодиффузии может объясняться механизмом резонансного взаимодействия дискретных фотонных возмущений с широкополосным рассеянным излучением, рассмотренным в приближении модели резонанса Фано.

Практическая значимость работы. В диссертации показано, что наружная поверхность тонких плёнок и многослойных систем (толщиной до 100 нм), покрывающих образец опала, сохраняет форму и пространственную периодичность, характерную для границы раздела между опаловыми глобулами и нанесенным на них слоем вещества. Этот результат имеет практическое значение для развития технологии приготовления многослойных металлодиэлектрических структур, в частности, гибридных коллоидных плазмонно-фотонных кристаллов, позволяющих существенно расширить функциональные возможности фотонных кристаллов за счет дополнительного переноса энергии поверхностными плазмон-поляритонами вдоль границы раздела металл-диэлектрик.

Установлено, что метод спектральной эллипсометрии позволяет определять положения ФЗЗ в опале при больших углах падения света на образец, что существенно дополняет возможности метода брэгговской спектроскопии по исследованию оптических свойств ФК на основе опалов в указанном диапазоне углов.

Развитые в работе методические подходы и предложенные автором оригинальные комплексные учебные лабораторные работы могут быть также использованы в практике преподавания современных университетских курсов физики при изучении оптических свойств фотонных кристаллов и основ наноплазмоники.

Апробация результатов исследования.

Основные положения и результаты работы докладывались на международных научно-практических конференциях: «Нанотехнологии – производству» (Фрязино, 2006, 2013 гг.), «Герценовские чтения» (Санкт-Петербург, 2006 г.), на IX международной конференции «Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы» (Ульяновск, 2007 г.), на I и II международной научной школе-семинаре «Современные методы анализа дифракционных данных» (Великий Новгород, 2007, 2008 гг.), на IV Всероссийской научной конференции молодых учёных и сотрудников (Краснодар, 2007 г.), на международной научной конференции «Спектроскопия и кристаллохимия минералов 2007» (Екатеринбург, 2007 г.), на XX Всероссийском совещании по температуроустойчивым функциональным покрытиям (Санкт-Петербург, 2007 г.), на конференции (школе-семинаре) по физике и астрономии для молодых ученых Санкт-Петербурга и Северо-Запада «Физика. СПб» (Санкт-Петербург, 2009 г.), на I международной конференции «Образование в сфере нанотехнологий: Современные проблемы и перспективы» (Москва, 2010 г.), на XI международной учебно-методической конференции «Современный

физический практикум» (Минск, 2010 г.), на XII Международной конференции «Физика диэлектриков (Диэлектрики-2011)» (Санкт-Петербург, 2011 г.), на международной школе по сканирующей зондовой микроскопии (Ольборг, Дания, 2013 г.), на XX Всероссийской научно-практической конференции «Учебный физический эксперимент: Актуальные проблемы. Современные решения» (Глазов, 2015 г.), на X международной научно-практической конференции «Окружающая среда. Технологии. Ресурсы» (Резекне, Латвия, 2015 г.), на XIII Международной конференции «Физика в системе современного образования (ФССО-15)» (Санкт-Петербург, 2015 г.). Результаты диссертационного исследования неоднократно докладывались на семинарах кафедры физики ПсковГУ, РГПУ им. А.И. Герцена.

Структура и объем диссертации.

Общий объем работы составляет 162 страницы. Она включает в себя введение, три главы, заключение, библиографию из 161 наименования и содержит 77 рисунков и 1 таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, определяются цели и задачи проводимого исследования, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, формулируются основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Состояние физики фотонных и гибридных плазмонно-фотонных кристаллов» представлен обзор литературы, посвященной структуре, оптическим свойствам и методам изготовления фотонных кристаллов.

В параграфе 1.1 рассмотрены существующие представления о структуре и оптических свойствах фотонных кристаллов. В 1972 г. в работе В.П. Быкова [5] была показана невозможность распространения спонтанного излучения атома, находящегося внутри периодической структуры. В 1987 г. Э. Яблонович [6] и С. Джон [7] предложили модель системы, в рамках которой показано существование фотонных запрещенных зон (ФЗЗ) для распространения ЭМ волн определенных энергий. Таким образом, в современной физике было сформировано понятие принципиально нового класса структур – фотонных кристаллов, способных управлять потоком ЭМ излучения вследствие пространственной периодичности показателя преломления (ПП). Это открыло перспективы практического применения ФК для создания ЭВМ, оптоволоконных систем, солнечных батарей, параметрических датчиков и т.д. и послужило началом развития целого раздела физики – фотоники.

Показано, что ФЭС кристалла определяется диэлектрическим контрастом и относительным объемным содержанием компонент, размерностью и типом решетки, а её экспериментальное проявление обнаруживается в виде возникающих максимумов в спектрах отражения $R(\lambda)$ и коррелирующих с ними минимумов в спектрах пропускания $T(\lambda)$.

Параграф 1.2 посвящен обзору основных методов изготовления трёхмерных фотонных кристаллов. Рассмотрены такие методы синтеза, как трёхмерная лазерная литография, травление фокусированным ионным пучком, сварка с последующей микросборкой слоёв, полимеризация движущимся лазерным лучом. На примере опалов показана возможность использования для изготовления ФК субмикронных монодисперсных диэлектрических сфер, образующих трёхмерные упорядоченные структуры.

В параграфе 1.3 представлен обзор современного состояния физики плазмонно-фотонных кристаллов.

Одним из подходов к расширению функциональности ФК является построение металлодиэлектрических систем, обеспечивающих взаимодействие одновременно возбуждённых внешним излучением фотонных и плазмонных энергетических возмущений, что может приводить к существенному изменению ФЭС образца. В зависимости от способа размещения металла в кристалле механизм и условия гибридизации могут иметь существенные отличия. Так, в качестве плазмонных возбуждений для отдельно расположенных наночастиц металла могут выступать локальные резонансы, для связных металлических покрытий – поверхностные бегущие волны, называемые поверхностными плазмон-поляритонами (ППП).

Результат осуществлённого плазмон-фотонного волнового взаимодействия может проявляться в виде так называемого резонанса Фано. В общем случае резонанс Фано позволяет объяснять интерференцию волновых процессов, возникающих при изменении энергии системы одновременно через дискретные и непрерывные состояния [8]. В гибридных металлодиэлектрических структурах на основе ФК спектр дискретных энергетических состояний может быть представлен фотонными модами, тогда как широкополосный непрерывный спектр образован плазмонными резонансами и рассеянным на металле излучением. Примерами других физических процессов, получивших объяснение в рамках модели резонанса Фано, являются комбинационное рассеяние света на поляритонах [9], а также взаимодействие электронов с фотонами [10] и фононами [11].

Теоретически форма кривой резонанса Фано описывается формулой

$$C(E) = \frac{(E + q)^2}{E^2 + 1}, \quad (1)$$

где E – приведенная (нормированная) энергия (или частота) ЭМ волны, q – феноменологический параметр асимметрии формы линии, выражающий отношение вероятностей перехода системы в дискретное и в непрерывное состояния. Как показано в диссертационной работе, функция $C(E)$ позволяет описывать экспериментально полученный спектр отражения образца, отражающий его ФЭС. В то же время асимметрия кривой, определяемой уравнением (1), возможна лишь при условии, когда параметр q отличен от нуля или не стремится к бесконечности, отвечающему наличию интерференционных взаимодействий в системе, что в случае установления

хорошей корреляции со спектром $R(\lambda)$ и будет указывать на возникновение модифицированной ФЭС.

В параграфе 1.4 приводится решение классической задачи о возбуждении и распространении электромагнитных волн вдоль границы раздела металл-диэлектрик и рассматриваются экспериментальные методы возбуждения поверхностных плазмон-поляритонов (ППП), согласно одному из которых образование бегущих поверхностных ЭМ волн может происходить при наличии периодического рельефа на границе двух сред [12]. Осуществим также обратный процесс: ППП, распространяющийся вдоль границы раздела с периодическим рельефом, способен испустить фотон и прекратить существование. Указанные особенности открывают возможности практического создания гибридных плазмонно-фотонных систем, расширяющих функциональные возможности исходных ФК по управлению потоками ЭМ излучения.

Вторая глава «Объекты и методы исследования» посвящена описанию экспериментальных методов получения и исследования структуры и оптических свойств объектов изучения.

В параграфе 2.1 описаны структурные особенности опалов как фотонных кристаллов. Синтетический опал образован системой глобул из кремнезёма или полимера, упакованных в ГЦК структуру [13], способную играть роль трёхмерной дифракционной решётки для ЭМ излучения. Вследствие брэгговской дифракции свет с длинами волн, соизмеримыми с периодом решётки, не проникает в ФК, что приводит к возникновению ФЗЗ. Подобные структуры позволяют управлять потоком ЭМ излучения, что открывает широкие перспективы их практического применения. Изменяя размеры сфер (обычно от 100 до 1000 нм) и вводя в тетраэдрические и октаэдрические пустоты между глобулами разнообразные вещества, можно получать ФЗЗ в различных диапазонах энергий [14].

В работе исследовались массивные образцы на основе искусственных опаловых матриц, синтезированных в ЦНИТИ «Техномаш» (г. Москва), а также опалоподобные ПММА плёнки, полученные в университете Эрланген-Нюрнберг (Германия).

В параграфе 2.2 описаны такие методы получения нанокпозиционных материалов на основе опалов, как заполнение веществом-«гостем» исходной опаловой матрицы, модификация сфер и кристаллической структуры опала, получение инвертированных опалов и фотонно-кристаллических гетероструктур на основе опалов.

Анализ литературных данных позволил установить, что диспергирование в матрице опала веществ различной природы приводит к смещению энергетического положения ФЗЗ в длинноволновую область спектра. Инвертирование опалов, заключающееся в замещении пустот на каркасообразующее вещество с большим, чем у диоксида кремния ПП, позволяет смещать положение ФЗЗ в коротковолновую область спектра. Предельное значение величины ПП материалов, используемых для изготовления наноккомпозитов, накладывает физическое ограничение на

возможность изменения ФЭС образцов обоих типов. Таким образом, для расширения функционала опала как ФК по управлению потоками ЭМ излучения необходимо создание альтернативных оптических систем. Примером одной из них являются гибридные металлодиэлектрические структуры на основе опала.

Параграф 2.3 посвящен рассмотрению методов изучения структуры и оптических свойств образцов.

Метод брэгговской спектроскопии рассматривается в качестве основного для исследования оптических свойств ФК на основе опалов. Представленные в диссертационной работе результаты соответствующих экспериментальных исследований были выполнены при помощи установки на базе спектрометра USB650 Red Tide (Ocean Optics, Inc.) с рабочим интервалом длин волн 420-800 нм.

Наряду с методом брэгговской спектроскопии в работе также использовался метод спектральной эллипсометрии. При больших углах падения света распространение света в образце может носить анизотропный характер, выражающийся в различии угловых дисперсий энергетических резонансов в s - и p - поляризованном свете. Это вызывает сложности в интерпретации оптических спектров, полученных в неполяризованном свете, которые несут в себе информацию одновременно от s - и p - мод [15]. Экспериментально установленное ранее значительное усиление поляризационной анизотропии в области дифракционных резонансов, как в прошедшем, так и в отраженном свете однозначно указывает на её связь с фотонно-кристаллическими свойствами опалов [16]. Таким образом, в качестве характеристик данных свойств возможно использование меры поляризационной анизотропии, определяемой отношением интенсивностей s - и p - мод.

Отношение комплексных коэффициентов отражения для двух типов поляризации световой волны R_p/R_s – в плоскости падения (p) и перпендикулярно к ней (s) – является характеристикой оптической анизотропии среды и связано с эллипсометрическими параметрами ψ и Δ соотношением:

$$\operatorname{tg}\psi e^{i\Delta} = \frac{R_p}{R_s} = \rho \quad (2)$$

На основании полученного значения ρ возможен также расчёт показателя преломления образца по формуле Френеля:

$$n_{eff} = \operatorname{Re} \left\{ \operatorname{tg}\varphi \sqrt{1 - \frac{4\rho \sin^2\varphi}{(\rho + 1)^2}} \right\} \quad (3)$$

Таким образом, установление факта корреляции максимумов спектров $\Psi(\lambda)$ и $R(\lambda)$ для соответствующих углов позволяет использовать метод спектральной эллипсометрии для характеристики ФЭС опала. Представленные в диссертационной работе результаты эллипсометрических исследований выполнены с использованием спектроэллипсометра «Эллипс–1891» (г. Новосибирск).

В параграфе 2.4 рассматривается технология изготовления образцов, являющихся объектами диссертационного исследования.

Для установления возможных различий влияния природы диспергированных наночастиц на изменение ФЭС исходной матрицы были получены экспериментальные образцы типа I / опал и Ag / опал. Синтез нового нанокпозиционного материала I / опал осуществлялся посредством адсорбции йода из газовой фазы в течение 11 часов при температуре 607 К и парциальном давлении паров йода ~ 7 атм. Введение металлических наночастиц серебра производилось методом электротермодиффузии с серебряного анода в течение 2 часов при напряженности электрического поля 1,7 кВ/см и постоянной температуре (664 \pm 2) К; при этом сила тока через образец увеличилась с течением времени в 500 раз (от 2,6 мкА до 1,3 мА), выйдя на насыщение. Ранее использование указанного метода применительно к другим конденсированным системам позволяло получать тонкие металлические дендриты. Возникновение подобных структур в полостях опала могло привести к существенному увеличению эффективности рассеяния света.

Изготовленные гибридные плазмонно-фотонные гетерокристаллы (ПФГК) представляли собой комбинацию ФК на основе опала и многослойного металлодиэлектрического покрытия, полученного на поверхности опала методами магнетронного распыления на установке АТС ORION SERIES SPUTTERING SYSTEM и резистивного термического испарения в вакууме. Проведённый теоретический анализ показал, что в случае нанесения тонкого металлического покрытия на поверхность ФК, обладающего периодическим рельефом и при условии повторении плёнкой топологии этой поверхности, возможно создание условий гибридного взаимодействия фотонных и плазмонных мод с образованием новой ФЭС.

Для изучения структуры исследованных в диссертационной работе образцов ПФГК применялись сканирующие зондовые микроскопы компаний «НТ-МДТ» и «Наноиндустрия». Электронно-микроскопические изображения получены на сканирующих электронных микроскопах ZEISS FIB-SEM GEMINI и VEGA // LMU Tescan (рис. 1). Результаты проведённого исследования позволили сделать вывод о том, что наружная поверхность тонких плёнок и многослойных систем (толщиной до 100 нм), покрывающих образец опала, сохраняет форму и пространственную периодичность, характерную для границы раздела между опаловыми глобулами и нанесенным на них слоем вещества. Таким образом, было доказано выполнение условия возбуждения ППП на границе раздела металл-диэлектрик, необходимое для построения гибридных плазмонно-фотонных систем.

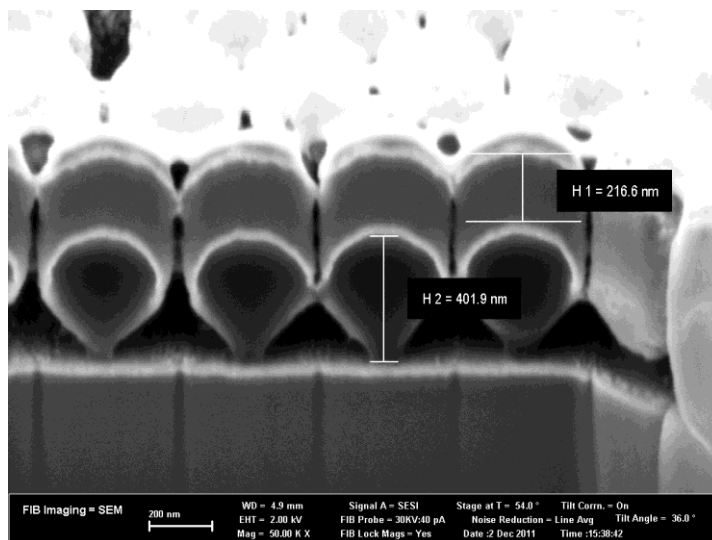


Рис. 1. СЭМ изображение (срез слоёв) ПФГК опал/Ag/SiO₂/Ag.

В третьей главе «Оптические свойства гетерогенных металлодиэлектрических кристаллов на основе опалов и наноструктур, полученных введением наночастиц в опаловую матрицу» представлены результаты экспериментального исследования образцов.

В параграфе 3.1 приведены результаты измерения оптических характеристик массивных образцов синтетических опалов и опалоподобных ПММА плёнок методами брэгговской спектроскопии и эллипсометрии. При этом обнаружены корреляция спектральных зависимостей эллипсометрического параметра $\Psi(\lambda)$ и спектров брэгговского отражения $R(\lambda)$, а также сдвиг максимумов в спектрах обоих типов в «синюю» область при увеличении угла падения света.

В параграфе 3.2 представлены результаты исследования оптических свойств нанокпозиционного материала I / опал. Показано, что для наноструктуры типа I / опал наблюдается дисперсионный сдвиг брэгговских максимумов в «синюю» область спектра при увеличении угла падения света, характерный для исходной матрицы. Сравнение спектров отражения материала I / опал и исходной матрицы, полученных при одинаковом угле падения света, позволяет сделать вывод о том, что введение наночастиц йода приводит к заметному сдвигу брэгговских максимумов в «красную» область спектра, что объясняется увеличением эффективного показателя преломления образца.

Как и для случая образцов синтетического опала, обнаружена корреляция спектральных зависимостей эллипсометрического параметра $\Psi(\lambda)$ и спектров брэгговского отражения $R(\lambda)$ (рис. 2). Это позволяет сделать вывод о том, что метод спектральной эллипсометрии дополняет стандартные методы брэгговской спектроскопии по определению ФЭС образцов при больших углах падения света, когда интенсивность брэгговских резонансов невелика, а поляризационная анизотропия распространения света в опалах, наоборот, максимально выражена. На примере наноккомпозита

I / опал также показана возможность использования эллипсометрических данных для определения эффективного ПП полученного материала.

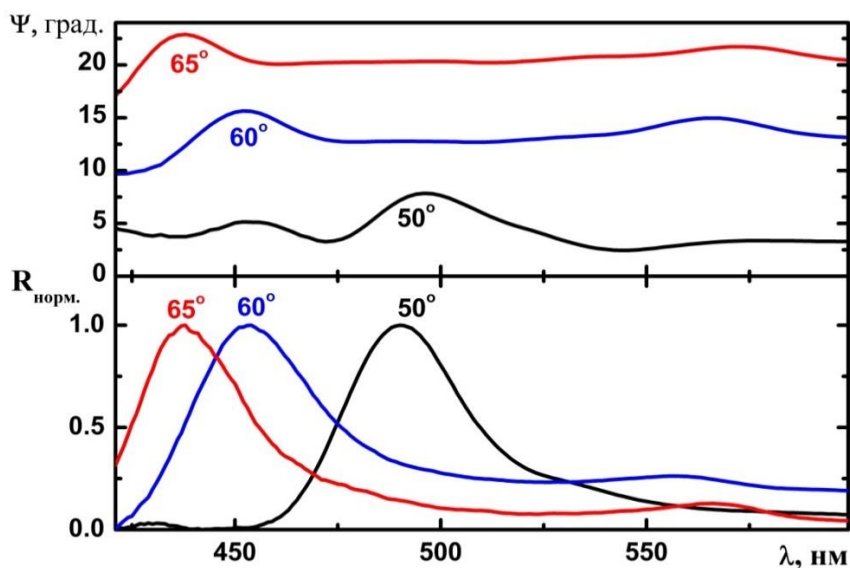


Рис. 2. Спектральная зависимость эллипсометрического параметра $\Psi(\lambda)$ и нормированные спектры отражения $R(\lambda)$ нанокompозита I / опал при различных углах падения света.

Параграф 3.3 посвящен результатам экспериментального изучения оптических свойств многослойных металлодиэлектрических гибридных ПФГК. Указанные структуры представляют собой различные комбинации ФК на основе опала с оптическим резонатором (интерференционным фильтром) из прозрачного диэлектрика, помещенного между плоскими или профилированными пленками металла. Если бы гибридизации ФЭС в этой системе не наблюдалось, результирующий спектр пропускания ПФГК $T_{\text{ПФГК}}(\lambda)$ в идеальном случае представлял бы собой суперпозицию энергетических структур обоих компонентов как последовательно расположенных друг за другом «пассивных» оптических элементов (ФК и фильтра) при отсутствии взаимодействия между ними: $T_{\text{ПФГК}}(\lambda) = T_{\text{ФК}}(\lambda) \times T_{\text{фильтр}}(\lambda)$. Однако, как показывает эксперимент, отношение $r = T_{\text{ПФГК}}(\lambda) / (T_{\text{ФК}}(\lambda) \times T_{\text{фильтр}}(\lambda))$ демонстрирует отчетливую спектральную зависимость, что свидетельствует о произошедшей гибридизации ФЭС.

В параграфе 3.4 рассмотрены оптические свойства гибридного металлодиэлектрического кристалла Ag / опал, полученного путём заполнения серебром объёма исходной матрицы опала.

Сравнение спектров отражения исходной матрицы опала и нанокompозиционного материала Ag / опал (рис. 3) показывает, что введение серебра в опаловую матрицу методом электротермодиффузии приводит к заметному сдвигу максимумов брэгговского отражения фотонного кристалла

в «красную» область при фиксированных значениях угла падения света. Подобное «красное» смещение максимумов в спектрах отражения по сравнению с соответствующими спектрами отражения исходной матрицы наблюдалось ранее при введении многих других веществ в опаловые матрицы. Как видно из рис. 3, наблюдается также «синий» сдвиг максимумов в спектрах обоих типов при увеличении угла падения, обусловленный брэгговской дисперсией.

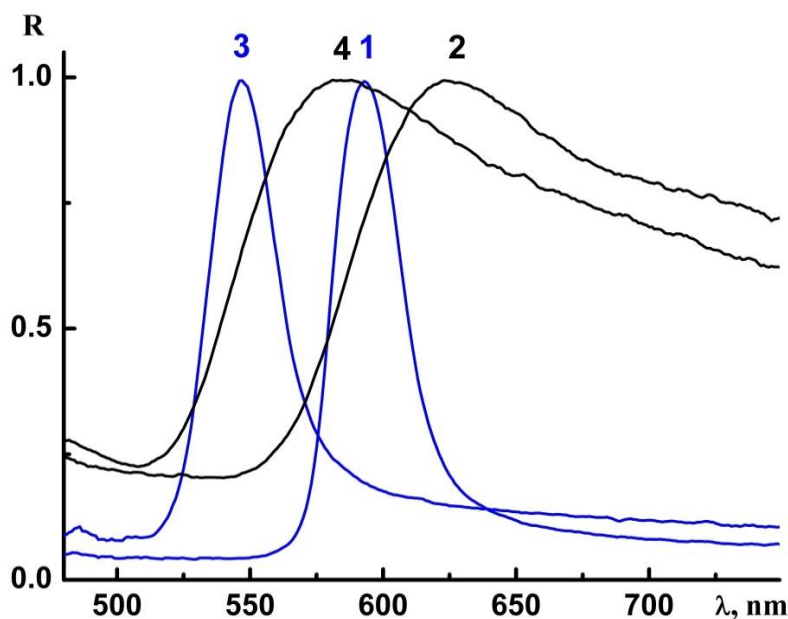


Рис. 3. Нормированные спектры отражения исходной матрицы опала (1, 3) и нанокomпозиционного материала Ag / опал (2, 4) при углах падения света 15° (1, 2) и 35° (3, 4).

Обращает на себя особое внимание ярко выраженная асимметричная форма широких полос в спектрах отражения нанокomпозита Ag / опал, резко отличающихся от соответствующих кривых $R(\lambda)$ исходной опаловой матрицы (рис. 3). Подобный профиль характерен для резонанса Фано и может быть теоретически описан с помощью формулы (1). Спектр отражения $R(E)$ нанокomпозита Ag / опал при угле падения света $\theta = 15^\circ$ и его аппроксимация с помощью формулы Фано (1) при $q \approx -2$ представлены на рисунке 4. Видно, что форма экспериментальной кривой удовлетворительно аппроксимируется функцией (1) в рамках теории резонанса Фано, который возникает вследствие интерференции двух колебательных процессов. Можно полагать, что в данном случае в роли одного из них выступает брэгговский дифракционный резонанс в ФК, а второй представляет собой широкополосное рассеянное ЭМ излучение. В образцах Ag / опал это рассеяние может, по-видимому, происходить на неоднородностях в виде тонких металлических дендритов,

которые проникают в твердый диэлектрик с серебряного анода при длительном высокотемпературном электролизе.

Аналогичные результаты были получены в работе и для других углов падения света. При этом с ростом угла падения наблюдалось уменьшение абсолютной величины параметра q , определяющего эффективность обмена энергией между соответствующими физическими процессами. Этот факт можно связать с ростом вклада рэлеевского рассеяния, интенсивность которого обратно пропорциональна четвертой степени длины волны λ , при увеличении угла падения света на образец. При этом должна выполняться зависимость вида $|q| \approx \text{const} \cdot \lambda^4$, что подтверждается полученными в работе экспериментальными результатами.

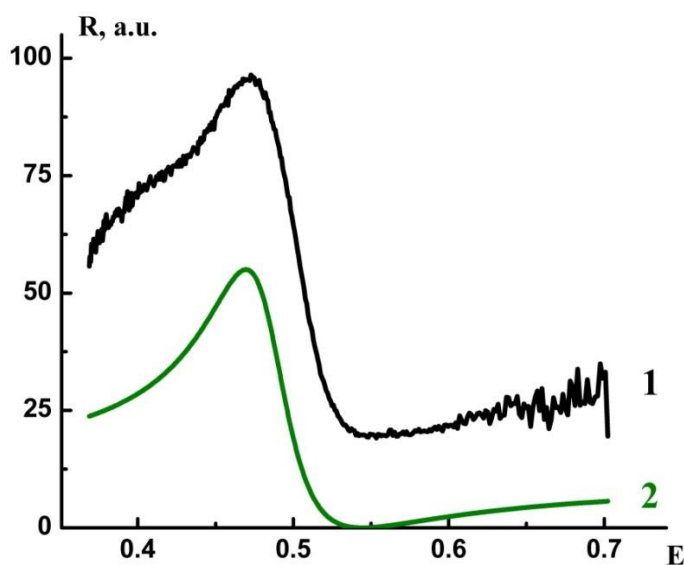


Рис. 4. Спектр отражения нанокompозита Ag / опал (1) при угле падения света 15° и его аппроксимация с помощью формулы Фано (2). Кривые 1 и 2 для наглядности смещены по вертикали ($E = D/\lambda$, D – диаметр сфер опала).

Завершает диссертацию **заключение**, содержащее основные результаты и выводы работы, и **список цитируемой литературы**.

Заклучение

Основные результаты и выводы работы состоят в следующем.

1. Проведено комплексное экспериментальное исследование оптических свойств фотонно-кристаллических структур методами эллипсометрии и брэгговской спектроскопии.

2. Установлено, что использование спектральной эллипсометрии для изучения оптических характеристик фотонных кристаллов на основе опалов дополняет при больших углах падения света стандартные методы, основанные на спектроскопии брэгговского отражения. Обнаружены корреляция спектральных зависимостей эллипсометрического параметра

$\Psi(\lambda)$ и спектров брэгговского отражения $R(\lambda)$, а также сдвиг максимумов в спектрах обоих типов в «синюю» область при увеличении угла падения.

3. Получен новый нанокпозиционный материал I / опал на основе опаловой матрицы посредством адсорбции йода из паров и установлен рост эффективного показателя преломления этого нанокпозиита по сравнению с показателем преломления исходной опаловой матрицы.

4. Показано, что наружная поверхность тонких плёнок и многослойных систем (толщиной до 100 нм), покрывающих образец опала, сохраняет форму и пространственную периодичность, характерную для границы раздела между опаловыми глобулами и нанесенным на них слоем вещества.

5. Нанесение связных металлических покрытий на поверхность опала вызывает перестройку фотонно-энергетической структуры образца вследствие гибридизации электромагнитных мод поверхностных плазмон-поляритонов с собственными модами фотонного кристалла.

6. Получен новый нанокпозиционный материал Ag / опал путем введения серебра в матрицу опала методом электротермодиффузии.

7. Предложено объяснение асимметричной формы широких полос, обнаруженных в спектрах брэгговского отражения нанокпозиита Ag / опал, на основе резонанса Фано.

Основное содержание и результаты диссертации отражены в следующих публикациях:

1. Лукин А.Е., Соловьёв В.Г., Яников М.В. Установка для экспериментального исследования спектров отражения и пропускания фотонных кристаллов // "Физика в школе и вузе": Международный сборник научных статей. – Вып. 4. – СПб: РГПУ им. А.И. Герцена, 2006. – С. 113-116.

2. Лукин А.Е., Яников М.В., Соловьёв В.Г. Экспериментальная установка для изучения спектров отражения и пропускания фотонных кристаллов на основе плёнок опалов // Труды Псковского политехнического института. Естествознание и математика. Гуманитарные науки. – № 10.1. – Псков: ППИ, 2006. – С.20-23.

3. Балабинская А.С., Вейсман В.Л., Иванова М.С., Лукин А.Е., Соловьёв В.Г., Яников М.В. Применение массивных образцов и плёнок опалов в технологии создания наноструктур с фотонно-кристаллическими свойствами // "Нанотехнологии-производству – 2006": Труды Международной научно-практической конференции. – М.: "Янус-К", 2006. – С. 82-85.

4. Лукин А.Е., Яников М.В. Исследование спектров отражения и пропускания массивных образцов и пленок опалов // "Современные методы анализа дифракционных данных (топография, дифрактометрия, электронная микроскопия)": Сборник материалов и программа Первой международной научной школы-семинара. – Великий Новгород, 2007. – С. 162-164.

5. Вейсман В.Л., Иванова М.С., Лукин А.Е., Соловьёв В.Г., Яников М.В. Спектры отражения и пропускания массивных образцов и пленок опалов //

«Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы»: Труды IX Международной конференции. – Ульяновск: УлГУ, 2007. – С. 217.

6. Ванин А.И., Вейсман В.Л., Гращенков С.И., Иванова М.С., Марков В.Н., Панькова С.В., Соловьёв В.Г., Трифонов С.В., Филиппов Д.А., Яников М.В. Экспериментальное исследование физических свойств регулярных матричных композитов с наноструктурированными неорганическими веществами // Труды IV Всероссийской научной конференции молодых учёных и сотрудников. – Т. 2. – Секции "Физика и астрономия", "Математика, механика и информатика". – Краснодар: Просвещение-Юг, 2007. – С.21-23.

7. Соловьёв В.Г., Ванин А.И., Вейсман В.Л., Гращенков С.И., Иванова М.С., Марков В.Н., Панькова С.В., Трифонов С.В., Яников М.В., Балабинская А.С., Бондаренко И.К., Ганго С.Е., Иванова Е.Н., Лукин А.Е. Изучение физических свойств нанокпозиционных материалов на основе регулярных пористых диэлектрических матриц цеолитов и опалов // Вестник Псковского государственного педагогического университета. Серия «Естественные и физико-математические науки». – 2007. – Выпуск 2. – С. 119-127.

8. Балабинская А.С., Иванова М.С., Лукин А.Е., Соловьёв В.Г., Яников М.В. Оптические спектры массивных образцов и плёнок опалов // Материалы международной научной конференции «Спектроскопия и кристаллохимия минералов 2007». – Екатеринбург: Институт геологии и геохимии УрО РАН, 2007. – С. 126-127.

9. Алексеева Н.О., Вейсман В.Л., Лукин А.Е., Марков В.Н., Панькова С.В., Соловьёв В.Г., Ткаль В.А., Яников М.В. Получение и обработка СТМ – изображений нанокпозитивов на основе опалов // "Современные методы анализа дифракционных данных (дифракционные методы для нанотехнологии)": Сборник материалов и программа Второй международной научной школы-семинара. – Великий Новгород, 2008. – С. 53-54.

10. Алексеева Н.О., Вейсман В.Л., Лукин А.Е., Марков В.Н., Панькова С.В., Соловьёв В.Г., Ткаль В.А., Яников М.В. Исследование нанокпозитивов на основе опалов с помощью комплекса нанотехнологического оборудования «Умка» // Нанотехника. – 2008. – № 4 (16). – С. 9-11.

11. Tkal' V.A., Voronin N.A., Solov'ev V.G., Alekseeva N.O., Pan'kova S.V., Yanikov M.V. Wavelet processing of nanocomposite images obtained by scanning tunnel and electron microscopes // Inorganic Materials. – 2010. – Vol. 46. – No. 14. – P. 119-121.

12. Алексеева Н.О., Вейсман В.Л., Панькова С.В., Соловьёв В.Г., Яников М.В. Исследование фотонно-кристаллических структур и нанокпозитивов на основе опалов в лабораторном практикуме по экспериментальной физике вуза // Современный физический практикум: Материалы XI международной учебно-методической конференции. – Минск: Изд. центр БГУ, 2010. – С. 124-125.

13. Дашина А.Ю., Иванова М.С., Соловьёв В.Г., Ханин С.Д., Яников М.В. Элементы физики низкоразмерных систем в подготовке педагогических кадров // Физическое образование в вузах. – 2009. – Т. 15. – № 4. – С. 30-38.

14. Вейсман В.Л., Михайлов А.Г., Соловьёв В.Г., Трифонов С.В., Яников М.В. Электропроводность диэлектрических опаловых матриц // Физика диэлектриков (Диэлектрики-2011): Материалы XII Международной конференции. – Т. 1. – СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2011. – С. 54-57.

15. Алексеева Н.О., Вейсман В.Л., Годунова И.В., Панькова С.В., Соловьёв В.Г., Яников М.В. Экспериментальное исследование фотонно-кристаллических наноструктур на основе диэлектрических матриц опалов методами брэгговского отражения и атомно-силовой микроскопии в вузовской физической лаборатории // Физика диэлектриков (Диэлектрики-2011): Материалы XII Международной конференции. – Т. 2. – СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2011. – С. 350-353.

16. Алексеева Н.О., Вейсман В.Л., Лукин А.Е., Панькова С.В., Соловьёв В.Г., Яников М.В. Экспериментальное исследование поверхностных свойств металлодиэлектрических наноструктур на основе опалов // Нанотехника. – 2012. – № 3 (31). – С. 23-26.

17. Алексеева Н.О., Вейсман В.Л., Лукин А.Е., Панькова С.В., Соловьёв В.Г., Яников М.В. Экспериментальное исследование поверхности опалов, покрытых тонкой пленкой алюминия // Вестник Псковского государственного университета. Серия «Естественные и физико-математические науки». – 2012. – Выпуск 1. – С. 176-181.

18. Соловьёв В.Г., Яников М.В., Романов С.Г. Изучение оптических свойств фотонных кристаллов и основ наноплазмоники в университетском курсе физики // Вестник Псковского государственного университета. Серия «Естественные и физико-математические науки». – 2013. – Выпуск 2. – С. 205-213.

19. Alexeeva N., Sema G., Lukin A., Pan'kova S., Romanov S., Solovyev V., Veisman V., Yanikov M. Experimental Investigation of Self- Assembled Opal Structures by Atomic Force Microscopy, Spectroscopic Ellipsometry and Reflectometry // Journal of Self-Assembly and Molecular Electronics. – 2013. – Vol. 1. – P. 209-222.

20. Яников М.В., Вейсман В.Л., Гонян А.А., Соловьёв В.Г., Цема Г.С. Получение и экспериментальное исследование оптических свойств наноструктурированного йода в пористой матрице опала // Вестник Псковского государственного университета. Серия «Естественные и физико-математические науки». – 2013. – Выпуск 3. – С. 165-169.

21. Алексеева Н.О., Вейсман В.Л., Лукин А.Е., Панькова С.В., Соловьёв В.Г., Яников М.В. Экспериментальное исследование морфологии наноразмерных металлических покрытий на поверхности опалов // Нанотехника. – 2013. – № 4 (36). – С. 77.

22. Яников М.В., Вейсман В.Л., Гонян А.А., Лукин А.Е., Романов С.Г., Соловьёв В.Г., Гербредер В.И., Огурцов А.С. Экспериментальное

исследование физических свойств наночастиц серебра, введенных методом электротермодиффузии в пористую матрицу опала // Вестник Псковского государственного университета. Серия «Естественные и физико-математические науки». – 2014. – Выпуск 5. – С. 196-201.

23. Яников М.В., Вейсман В.Л., Романов С.Г., Соловьёв В.Г. Экспериментальное изучение резонанса Фано в университетском курсе физики // Проблемы учебного физического эксперимента: Сборник научных трудов. – Выпуск 25. – М.: ИСМО РАО, 2015. – С. 96-98.

24. Veisman V.L., Romanov S.G., Solovyev V.G., Yanikov M.V. Optical properties of nanostructured silver, embedded by electro-thermo-diffusion in opal photonic crystal // Environment. Technology. Resources: Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference. – Rezekne, Latvia, 2015. – Vol. 1. – P. 230-231.

25. Остроумова Ю.С., Соловьёв В.Г., Ханин С.Д., Яников М.В. Формирование опыта освоения содержания перспективных направлений научно-технического развития на основе фундаментальных знаний в обучении физике: Учебное пособие. – Псков: ПсковГУ, 2015. – 96 с.

26. Вейсман В.Л., Лобарёв Д.С., Пучков Н.И., Романов С.Г., Соловьёв В.Г., Яников М.В. Наблюдение резонанса Фано в наносистеме Ag / опал // Вестник Псковского государственного университета. Серия «Естественные и физико-математические науки». – 2015. – Выпуск 6. – С. 106-113.

27. Остроумова Ю.С., Соловьёв В.Г., Ханин С.Д., Яников М.В. Формирование опыта применения фундаментальных знаний для освоения содержания перспективных направлений научно-технического развития // Материалы XIII Международной конференции «Физика в системе современного образования (ФССО-15)». – СПб.: РГПУ им. А.И. Герцена, 2015. – Т. 1. – С. 153-156.

Личный вклад автора состоит в выполнении основной экспериментальной части работы по созданию и усовершенствованию установки для изучения спектров отражения и пропускания с угловым разрешением фотонных кристаллов на основе опалов и исследованию их оптических свойств, математической обработке результатов экспериментов и разработке модельных представлений механизмов явлений распространения электромагнитного излучения в исследованных фотонно-кристаллических структурах. Все основные результаты и выводы диссертации, отраженные в публикациях, принадлежат автору.

Цитируемая литература

1. Sakoda K. Optical Properties of Photonic Crystals. – Springer, 2001. – 223 p.

2. Photonic crystals: Advances in design, fabrication, and characterization / Ed. by K. Busch, S. Lölkes, R.B. Wehrspohn, and H. Föll. – Wiley-VCH, 2004. – 354 p.

3. Joannopoulos J.D., Johnson S.G., Winn J.N., Meade R.D. Photonic crystals – molding the flow of light. – Princeton University press, 2008. – 286 p.
4. Romanov S.G., Korovin A.V., Regensburger A., Peschel U. Hybrid colloidal plasmonic-photonic crystals // *Advanced Materials*. – 2011. – V. 23. – P. 2515-2533.
5. Быков В.П. Спонтанное излучение в периодической структуре // *ЖЭТФ*. – 1972. – Т. 62. – № 2. – С. 505-513.
6. Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics // *Phys. Rev. Lett.* – 1987. – V. 58. – No. 20. – P. 2059-2062.
7. John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices // *Phys. Rev. Lett.* – 1987. – V. 58. – No. 23. – P. 2486-2489.
8. Fano U. Effects of configuration interaction on intensities and phase shifts // *Physical Review*. – 1961. – V. 124. – P. 1866-1878.
9. Агранович В.Ж., Лалов И.И. Эффекты сильного ангармонизма в спектрах оптических фононов и поляритонов // *Успехи физических наук*. – 1985. – Т. 146. – Вып. 2. – С. 267-302.
10. Дмитриев А.П., Имамов Э.З., Ясиевич И.Н. Резонанс Фано эффекта увлечения электронов фотонами в полупроводниках // *Физика и техника полупроводников*. – 1990. – Т. 24. – Вып. 12. – С. 2193-2197.
11. Алешкин В.Я., Антонов А.В., Гавриленко В.И., Гавриленко Л.В., Звонков Б.Н. Резонанс Фано в спектре примесной фотопроводимости InP, легированного мелкими донорами // *Физика твердого тела*. – 2008. – Т. 50. – Выпуск 7. – С. 1162-1165.
12. Майер С.А. Плазмоника: теория и приложения / Пер. с англ. Т.С. Нечаевой и Ю.В. Колесниченко; ред. С.С. Савинский. – М. - Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2011. – 296 с.
13. Балакирев В.Г., Богомолов В.Н., Журавлёв В.В., Кумзеров Ю.А., Петрановский В.П., Романов С.Г., Самойлович Л.А. Трехмерные сверхрешетки в матрицах опалов // *Кристаллография*. – 1993. – Т. 38. – № 3. – С. 111-120.
14. Astratov V.N., Bogomolov V.N., Kaplyanskii A.A., Prokofiev A.V., Samoilovich L.A., Samoilovich S.M., Vlasov Yu.A. Optical spectroscopy of opal matrices with CdS embedded in its pores: Quantum confinement and photonic band gap effects // *Il Nuovo Cimento*. – 1995. – V. 17D. – No. 11-12. – P. 1349-1354.
15. Рыбин М.В., Самусев К.Б., Лимонов М.Ф. Экспериментальное исследование фотонной зонной структуры синтетических опалов в условиях низкого диэлектрического контраста // *Физика твердого тела*. – 2007. – Т. 49. – № 12. – С. 2174-2183.
16. Романов С.Г. Анизотропия распространения света в тонких плёнках опалов // *Физика твердого тела*. – 2007. – Т.49. – № 3. – С. 512-522.