



«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель директора Физико-технического
института
им. А.Ф. Иоффе РАН, доктор физ.-мат.наук


С.В.Лебедев

19 апреля 2016 года.

О Т З Ы В

ведущей организации

на диссертацию

Яникова Михаила Владимировича

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

представленную на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук по специальности

01.04.07 – физика конденсированного состояния

Актуальность темы диссертации

На протяжении последних десятилетий большой интерес вызывают физические свойства нанокompозитов, полученных матричным методом, предложенным в 70-е годы XX в. В.Н. Богомоловым. Этот метод заключается в диспергировании различных веществ в регулярной системе полостей субнано- и нанопористых диэлектрических матриц (цеолитов, асбестов, опалов и др.). Гранецентрированная кубическая структура опала построена из плотно упакованных сфер субмикронных размеров и выступает как трехмерная дифракционная решетка для видимого света. Благодаря этому опалы рассматривают как фотонные кристаллы, способные управлять потоком электромагнитного излучения. Для расширения функциональных возможностей фотонных кристаллов неоднократно предпринимались попытки дополнить дифракционные резонансы оптическими возбуждениями иной природы, например, плазмонными, экситонными, фононными и т.д. Так в последние годы выделился особый класс гибридных металлодиэлектрических плазмонно-фотонных кристаллов на основе опалов, перенос света в которых определяется совместно действующими дифракционными и плазмонными резонансными транспортными механизмами.

Представленная работа развивает указанное научное направление и содержит результаты экспериментального исследования закономерностей оптических явлений в фотонных кристаллах и гибридных металлодиэлектрических структурах на основе опаловых матриц.

Результаты проведенных исследований важны в плане развития физики низкоразмерных систем и ее практических приложений в фотонике и плазмонике.

Основные результаты диссертации и их новизна

В работе проведено комплексное экспериментальное исследование оптических свойств фотонно-кристаллических структур методами эллипсометрии и брэгговской спектроскопии.

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. Впервые обнаружены корреляция спектральных зависимостей эллипсометрического параметра $\Psi(\lambda)$ и спектров брэгговского отражения $R(\lambda)$.

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

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.

Экспериментально подтверждено, что 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.

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

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

Публикации и апробация

Материалы диссертации опубликованы в 27 печатных работах (в том числе – в 6 статьях в изданиях, рекомендованных ВАК Российской Федерации) и апробированы на 13 Международных и 4 Всероссийских научных конференциях.

Достоверность полученных результатов

Основные результаты и выводы диссертации являются достоверными и хорошо обоснованными. Это обеспечивается выбором объектов и 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.

Практическая значимость

В диссертации показано, что наружная поверхность тонких плёнок и многослойных систем, 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.

Одним из основных методов исследования структуры и оптических свойств фотонных кристаллах на основе опалов является метод брэгговской спектроскопии, информативность которого по ряду причин существенно уменьшается при больших углах падения света на образец. Поэтому осуществленная автором разработка дополнительных экспериментальных методик исследования именно для указанного диапазона углов имеет существенную практическую значимость.

Содержание работы

Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы из 161 наименования. Общий объем диссертации составляет 162 страницы, включая 77 рисунков и 1 таблицу.

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 представлен обзор литературы, посвященной структуре, оптическим свойствам и методам изготовления фотонных кристаллов. Рассмотрены существующие представления о структуре, оптических свойствах и перспективах практического применения фотонных кристаллов для развития нового раздела физики – фотоники.

Описаны основные методы изготовления трёхмерных фотонных кристаллов, представлен обзор современного состояния физики плазмонно-фотонных

кристаллов. Отмечено, что одним из подходов к расширению функциональности фотонных кристаллов является построение металлодиэлектрических систем. При этом в качестве плазмонных возбуждений для отдельно расположенных наночастиц металла могут выступать локальные резонансы, а для связанных металлических покрытий – поверхностные плазмон-поляритоны, возбуждение которых может происходить, в частности, при наличии периодического рельефа на границе двух сред.

Результат плазмон-фотонного волнового взаимодействия может проявляться в виде резонанса Фано, который позволяет объяснить интерференцию волновых процессов, возникающих при изменении энергии системы одновременно через дискретные и непрерывные состояния. В металлодиэлектрических структурах на основе фотонных кристаллов спектр дискретных энергетических состояний может быть представлен фотонными модами, тогда как широкополосный непрерывный спектр образован плазмонными резонансами и рассеянным на металле излучением.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальных методов получения и исследования структуры и оптических свойств объектов изучения.

Подробно описываются и анализируются структурные особенности опалов как фотонных кристаллов, а также технология получения и методы экспериментального исследования оптических свойств нанокпозиционных материалов на основе опалов, в том числе – методы брэгговской спектроскопии и спектральной эллипсометрии. Установление факта корреляции спектральных зависимостей эллипсометрического параметра $\Psi(\lambda)$ и спектров брэгговского отражения $R(\lambda)$ позволило автору использовать метод спектральной эллипсометрии для изучения фотонно-кристаллических свойств исследуемых образцов.

Для установления возможных различий влияния природы диспергированных наночастиц на изменение ФЭС исходной матрицы в работе были получены экспериментальные образцы типа I / опал и Ag / опал. Исследованные в работе гибридные плазмонно-фотонные гетерокристаллы представляли собой комбинацию фотонного кристалла на основе опала и многослойного металлодиэлектрического покрытия, полученного на поверхности опала методами магнетронного распыления или резистивного термического испарения в вакууме. Проведённый анализ показал, что в случае нанесения тонкого металлического покрытия на поверхность фотонного кристалла, обладающего периодическим рельефом и при условии повторении плёнкой топологии этой поверхности, возможно создание условий гибридного взаимодействия фотонных и плазмонных мод.

Результаты проведённых в работе экспериментов позволили утверждать, что условие возбуждения поверхностных плазмон-поляритонов на границе раздела металл-диэлектрик, необходимое для построения гибридных плазмонно-фотонных систем, действительно выполняется. 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.

В третьей главе представлены результаты экспериментального исследования оптических характеристик фотонных кристаллов и гибридных металлодиэлектрических структур на основе опалов: массивных образцов синтетических опалов, опалоподобных плёнок, многослойных металлодиэлектрических гибридных плазмонно-фотонных кристаллов, а также нанокпозиционных материалов I / опал и Ag / опал.

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

Замечания

Положительно характеризуя работу М.В. Яникова, можно высказать, однако, и некоторые замечания:

1. Представляется достаточно убедительным предложенное в работе объяснение асимметричной формы широких полос, обнаруженных автором в спектрах брэгговского отражения нанокпозиционного Ag / опал, на основе резонанса Фано, который возникает вследствие интерференции двух колебательных процессов. По мнению автора, в этой роли может выступать брэгговский дифракционный резонанс в фотонном кристалле на фоне широкополосного электромагнитного излучения, рассеянного дендритами, образующимися при введении серебра в опаловую матрицу методом электротермодиффузии. Однако в диссертации отсутствуют прямые экспериментальные доказательства образования дендритной фрактальной структуры при введении серебра в опаловую матрицу при описанных в работе условиях эксперимента.

2. К числу новых результатов, впервые полученных в рецензируемой работе и имеющих практическое значение для проведения оптических экспериментов, несомненно, заслуживает внимания корреляция спектральных зависимостей эллипсометрического параметра $\Psi(\lambda)$ и спектров брэгговского отражения $R(\lambda)$ фотонных кристаллов на основе опалов при различных углах падения света. Однако автор диссертации не приводит данных о возможной спектральной зависимости другого эллипсометрического параметра – $\Delta(\lambda)$.

Заключение

Диссертационная работа Яникова Михаила Владимировича «Оптические свойства фотонных кристаллов и гибридных металлодиэлектрических структур на основе опалов» представляет собой законченное научное исследование, выполненное по актуальной тематике на высоком экспериментальном и теоретическом уровне. Достоверность результатов обеспечена применением современных экспериментальных методик с


проверкой их достоверности на измерении известных полученных ранее данных.

Приведённые выше замечания не влияют на общую положительную оценку работы.

Проведённые автором исследования представляют как научный, так и практический интерес. Автореферат и публикации в полной мере отражают содержание диссертации, выводы и заключения обоснованы. Работа отвечает всем требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (включая п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 24.09.2013 года). Автор диссертационной работы – Яников Михаил Владимирович – достоин присвоения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Выступление Яникова М.В. по материалам диссертационной работы заслушано на научном семинаре лаборатории физики анизотропных материалов Физико-технического института им. А.Ф.Иоффе 18 апреля 2016 года. Отзыв заслушан и обсужден на заседании административного совета Отделения физики диэлектриков и полупроводников ФТИ им.А.Ф.Иоффе 18 апреля 2016 года.

Зав. лабораторией физики
анизотропных материалов
Физико-технического института
им.А.Ф.Иоффе,
доктор физико-математических наук



18.04.16

Ю.А.Кумзеров