

ГАДЖИЕВ Гаджи Магомедрасулович

БРЭГГОВСКОЕ ОТРАЖЕНИЕ ВЫСОКОКОНТРАСТНЫХ ФОТОННЫХ
КРИСТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИТОВ ОПАЛ-ПОЛУПРОВОДНИК
(GaP, GaN, GaPN)

(специальность 01.04.10 - физика полупроводников)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2007

Работа выполнена в Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе РАН

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
В. В. Травников

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
А. В. Ильинский
доктор физико-математических наук,
С. Ю. Вербин

Ведущая организация: Балтийский государственный
технический университет «ВОЕНМЕХ»
имени Д.Ф. Устинова.

Защита состоится 08 ноября 2007 г. в 14⁰⁰ часов на
заседании диссертационного совета К 002.205.02 при
Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе РАН по адресу:
194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-технического
института им. А. Ф. Иоффе РАН.

Автореферат разослан 08 октября 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета К 002.205.02
кандидат физико-математических наук



Г. С. Куликов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. После опубликования экспериментальной работы Е. Яблоновича в 1987 году [1] и теоретической С. Джона [2] появился новый класс оптических материалов под названием *фотонные кристаллы*. Фотонные кристаллы (ФК) представляют собой объемные пространственно-периодические структуры, диэлектрическая проницаемость которых модулируется с периодом, сравнимым с длиной волны света. Взаимодействие фотонов с такими структурами приводит к существенной модификации пространственного распределения и энергетического спектра электромагнитного поля. В частности, возникают фотонные запрещенные зоны (ФЗЗ) – энергетические области, в пределах которых распространение света невозможно в определенных (неполная ФЗЗ) или во всех (полная ФЗЗ) направлениях внутри ФК. Предметом особого интереса являются ФК, обладающие трехмерной (3D) трансляционной симметрией, поскольку именно в таких кристаллах возможна реализация полной ФЗЗ [3]. Наличие запрещенных зон для фотонов создает предпосылки для управления вероятностью спонтанного излучения источника, помещенного внутрь ФК. Именно это уникальное свойство ФК определяет перспективы практического применения ФК в качестве элементов светодиодов и лазеров с низкороговой накачкой.

Одним из наиболее часто используемых материалов для создания 3D ФК являются синтетические опалы, представляющие собой трехмерную решетку плотноупакованных шаров аморфного кремнезема. Пространство между шарами образует подрешетку взаимопроникающих пор. Возможность внедрения в эти поры различных материалов создает предпосылки для создания композитных материалов, на основе которых могут быть созданы различные 3D ФК. Весьма перспективными являются ФК на основе композитов опал-полупроводник [4]. Такие композиты совмещают в себе уникальные свойства 3D периодической структуры опала с характерными оптическими и электрическими свойствами полупроводника. Использование полупроводников с разными значениями ширины запрещенной зоны и изменение степени заполнения пор материалом полупроводника позволяют целенаправленно менять свойства фотонных кристаллов.

В представляемой работе исследуются спектры брэгговского отражения опалов, в поры которых вводились соединения GaP, GaN и твердые растворы на их основе. Такие композиты являются весьма перспективными кандидатами для создания трехмерных ФК в видимом оптическом диапазоне, поскольку указанные полупроводники прозрачны в видимой области спектра и характеризуются большими значениями диэлектрической проницаемости. Кроме того, эти материалы интересны с

точки зрения их люминесцентных свойств, которые широко используются в современной полупроводниковой оптоэлектронике [5].

Внедрение в поры полупроводников с высоким показателем преломления приводит к увеличению модуляции диэлектрической проницаемости, особенно для инвертированных опалов, которые также исследуются в представляемой работе. Увеличение модуляции диэлектрической проницаемости должно оказывать существенное влияние на форму спектров брэгговского отражения. Вместе с тем, к моменту начала исследования было мало работ посвященных исследованию и анализу формы спектров брэгговского отражения в опалоподобных структурах. В частности, не уделялось достаточного внимания влиянию эффекта многоволновой брэгговской дифракции (МБД), возникающей при одновременном выполнении условия дифракции для лучей, отраженных от разных кристаллографических плоскостей и оказывающей определяющее влияние на форму спектров брэгговского отражения при больших углах падения света на ФК. Вместе с тем, такие исследования весьма актуальны, поскольку могут быть источником информации о структурных и диэлектрических параметрах опалоподобных композитов.

Цель работы. Основной целью настоящей работы являлось детальное экспериментальное исследование спектров брэгговского отражения высококонтрастных композитов опал-полупроводник и использование анализа формы и особенностей наблюдаемых спектров для количественной оценки структурных и диэлектрических параметров опалоподобных фотонных кристаллов. Целью работы являлось также исследование воздействия ФЗ на спектры люминесценции созданных композитов.

Научная новизна работы. Впервые в рамках представляемой диссертации продемонстрирована возможность создания трехмерных высококонтрастных фотонных кристаллов на основе композитов опал-полупроводник с использованием перспективных полупроводников GaN, GaP и твердого раствора GaPN. Для композита опал-GaPN обнаружено подавление спонтанного излучения за счет влияния фотонной запрещенной зоны этого ФК.

Впервые с использованием модели, основанной на приближении планарной слоисто-периодической среды и учитывающей эффекты спекания опаловых сфер SiO₂ и их одноосную деформацию, выполнен количественный анализ формы наблюдаемых спектров композитов опал-полупроводник. Для оценки деформации ГЦК решетки опалов предложено использовать структурные инварианты, устанавливающие связь между параметрами решетки ФК и положениями особенностей в спектрах многоволновой брэгговской дифракции.

Обнаружены ранее не наблюдавшиеся различия воздействия МБД для s- и p-поляризованных спектров.

Впервые выполнено исследование воздействия температурного отжига на параметры синтетических опалов.

Научная и практическая значимость работы. В работе продемонстрирована возможность создания трехмерных ФК путем внедрения в поры опалов полупроводников группы A_3B_5 . При этом удалось обнаружить влияние ФЗЗ на спектры люминесценции полупроводника синтезированного в порах опала. Это создает предпосылки для возможного использования таких ФК для изготовления приборов, основанных на возможностях управления световыми потоками (брэгговские выключатели, оптические фильтры, низкопороговые лазеры и т.д.). Созданные высококонтрастные ФК могут быть и модельными объектами для фундаментальных исследований особенностей взаимодействия поля с веществом. При исследовании созданных композитов удалось обнаружить новые особенности взаимодействия дифрагированных волн. Предлагаемая в работе методика определения параметров опалоподобных структур может быть использована для отработки технологии изготовления различных опалоподобных ФК. Обнаруженная зависимость параметров опалов от отжига показывает принципиальную возможность использования отжига для целенаправленного изменения параметров опалоподобных ФК.

Достоверность и научная обоснованность полученных результатов обеспечивается комплексным характером проводимых исследований на базе современного экспериментального оборудования, последовательным использованием хорошо проверенных экспериментальных методик и теоретических методов анализа, тщательным тестированием разработанных программ расчета и подтверждается согласованностью количественных расчетов с полученными экспериментальными данными, а также хорошей воспроизводимостью результатов при многократных повторях экспериментов.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих российских и международных конференциях: международной конференции “Аморфные и микрокристаллические полупроводники” (Санкт-Петербург, Россия, 2002); International symposium "Nanostructures: Physics and Technology" (Санкт-Петербург, Россия, 2001, 2003); Международной конференции «Фазовые переходы и критические явления в конденсированных средах» (Махачкала, 2002, 2004гг.); XI Международной научно-технической конференции (Москва, МГТУ им. П.Э.Баумана, 2005г.), а также на семинарах Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН.

Публикации. Основные результаты работы опубликованы в 12 работах. Список публикаций приведен в конце автореферата.

Выносимые на защиту основные положения:

1. Наблюдаемая в широком диапазоне углов падающего света дублетная структура спектров брэгговского отражения исследованных композитов опал-полупроводник возникает в результате взаимодействия основной волны, дифрагированной на плоскостях (111) параллельных поверхности образца, с дифрагированной волной, в формирование которой дают вклад процессы двойной дифракции на наклонных к поверхности плоскостях ($11\bar{1}$) и (200).

2. Геометрические и оптические параметры опалоподобных структур могут быть определены с помощью предложенной методики анализа спектров брэгговского отражения. При этом структурные параметры, ответственные за деформацию ГЦК решетки опалоподобных композитов, оцениваются в результате анализа особенностей, обусловленных многоволновой брэгговской дифракцией.

3. Температурный отжиг приводит к взаимопроникновению друг в друга структурных элементов опалов. Максимальная температура отжига более чем в десять раз увеличивает степень спекания сфероидов. Как следствие уменьшается расстояние между ними, увеличиваются коэффициент заполнения структуры сфероидами и эффективная диэлектрическая проницаемость опала в целом. Спекание происходит не только между сфероидами, но и внутри самих сфероидов между наночастицами α -SiO₂, из которых они состоят. Это спекание увеличивает диэлектрическую проницаемость сфероидов.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа изложена на 130 страницах, содержит 70 рисунка(ов), 3 таблицы и 111 библиографических ссылок. Работа состоит из введения, шести глав, выводов и списка цитируемой литературы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы, приводятся основные положения, выносимые на защиту, дается краткая аннотация по главам.

Первая глава диссертации носит обзорный характер и включает в себя анализ литературы в области создания и исследования 3D ФК. Обсуждаются структурные особенности 3D ФК, проявление ФЗЗ в оптических свойствах ФК (спектры отражения и пропускания), способы характеристики ФК. Приводится краткая характеристика работ, посвященных исследованию оптических свойств синтетических опалов и композитов на их основе. Обсуждаются результаты немногочисленных работ, в которых обнаружено проявление МБД света в ФК. В конце главы формулирована постановка задачи на основе анализа литературных данных.

Во **второй главе** приводится описание технологии изготовления композитов опал-GaP, GaN, GaPN. Указываются основные характеристики приборов, использованных для исследования структуры образцов, и подробно описывается установка, на которой регистрировались оптические спектры отражения и излучения фотонно-кристаллических композитов.

В **третьей главе** приведены результаты исследования структурных и оптических свойств композитов опал-полупроводник. Представлены данные электронно-микроскопического анализа синтетического опала, композита опал-GaP и инвертированного опал-GaN. Обсуждаются результаты рентгеноструктурного анализа композитов опал-GaN, GaP, $\text{GaP}_x\text{N}_{1-x}$. Показано, что вещество, синтезированное в порах композитов опал-GaP и опала-GaN является кристаллическим, а в порах композита опал- $\text{GaP}_x\text{N}_{1-x}$ вещество синтезируется в аморфном состоянии. Анализируются спектры рамановского рассеяния полученных композитов. Сделан вывод о том, что полупроводники GaN и GaP в порах опала формируются в виде нанокристаллитов.

Приводится общая характеристика исследованных спектров брэгговского отражения (БО) исходных опалов и композитов опал-полупроводник, измеренных при нормальном падении света на образец. Эти спектры представлены на рис.1. Обсуждается корреляция полуширины наблюдаемых максимумов БО с величиной диэлектрического контраста созданных композитов. Рис.1 наглядно демонстрирует, что максимумы БО созданных образцов практически перекрывают всю видимую область оптического спектра. Это обстоятельство имеет важное значение для возможного практического применения исследованных в данной работе опалоподобных ФК.

В **четвертой главе** излагаются результаты исследования угловых зависимостей спектров БО и люминесценции композитов опал-GaPN. На рис. 2 представлены спектры люминесценции композита опал-GaPN при

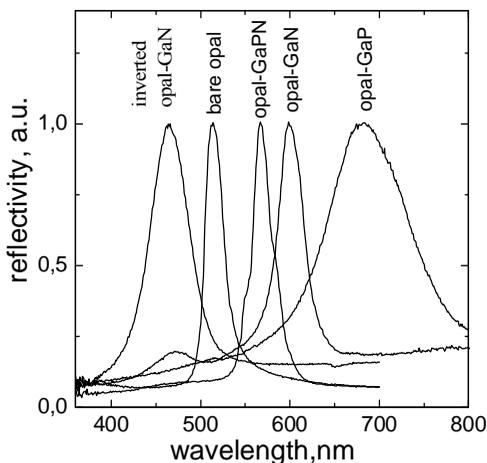


Рис.1. Спектры отражения s-поляризованного света исходного опала и композитов опал-полупроводник, измеренные при угле падения $\theta \approx 10^0$.

разных углах выхода излучения относительно нормали к поверхности. Стрелками на рисунке указано положение максимумов отражения для соответствующих углов отражения света, также отсчитываемых от нормали к поверхности. Из рис.2 видно, что смещение обнаруженного в спектрах люминесценции провала с изменением угла выхода излучения из образца коррелирует со смещением максимумов в спектрах БО. Поскольку максимумы в спектрах БО являются проявлением ФЗЗ, возникновение провала в спектрах люминесценции является следствием воздействия ФЗЗ на спектры спонтанного излучения.

В случае опалов, заполненных полупроводниками, вклад в ФЛ может давать как электронно-дырочная излучательная рекомбинация в самих полупроводниках, так и излучение опаловой матрицы. Форма, полуширина и положение полосы ФЛ в композите опал-GaPN заметно отличается от полос ФЛ, связанных с опаловой матрицей. Это указывает на то, что эта полоса обусловлена фотолюминесценцией рентгеноаморфного вещества, синтезированного в порах опала. На основании анализа и сопоставления энергетического положения полосы ФЛ с известными из литературы данными делается вывод о том, что основной вклад в наблюдаемую люминесценцию в исследованном образце дает излучательная рекомбинация неравновесных носителей в аморфной фазе полупроводника GaPN.

Таким образом, выполненные в работе исследования продемонстрировали возможность синтеза в порах опала полупроводников GaN, GaP и GaPN, излучательная рекомбинация которых может управляться фотонно-кристаллическими свойствами опаловой матрицы. Это создает предпосылки практического применения таких ФК.

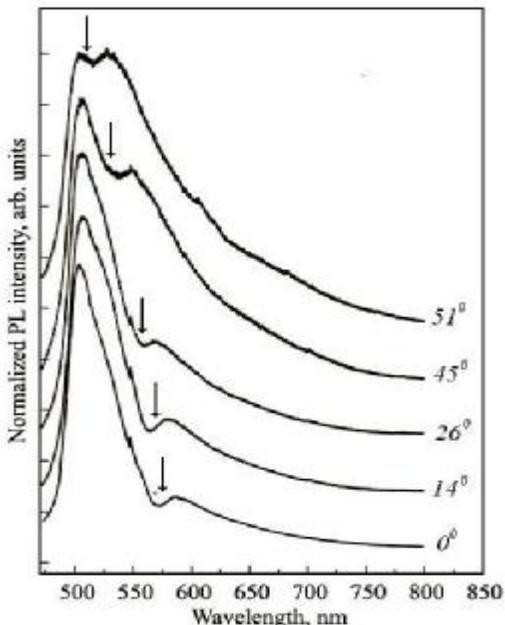


Рис.2. Спектры фотолюминесценции композита опал-GaPN при разных углах выхода излучения относительно нормали к поверхности образца. Стрелками указаны положения соответствующих максимумов БО.

Пятая глава посвящена результатам исследования проявления многоволновой брэгговской дифракции (МБД) в спектрах отражения света высококонтрастных композитов опал-полупроводник. В работе детально исследована зависимость спектров БО от угла падающего на образцы поляризованного света. В качестве примера на рис.3 представлены спектры композита опал-GaN, измеренные при разных углах падения q , отсчитыва-

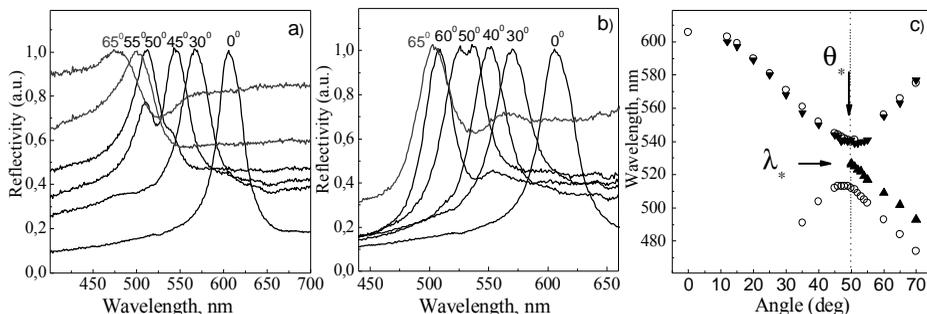


Рис. 3. Спектры отражения композита опал-GaN, измеренные при разных углах падающего на образец s-поляризованного (a) и p-поляризованного (b) света. Справа (c) представлены зависимости положения наблюдаемых максимумов спектров отражения от угла падения света на образец .

емых от нормали к поверхности. Спектры, соответствующие s-поляризации, представлены на рис.3(a), а p-поляризации на - рис.3(b). Угловые зависимости положения максимумов БО представлены на рис.3(c) (кружки для s-поляризации и треугольники для p-поляризации). В области малых углов, в соответствии с законом Брэгга, увеличение угла падения приводит к коротковолновому сдвигу максимумов БО. При этом положения максимумов БО для обеих поляризаций практически совпадают друг с другом. С ростом угла падения характер поведения спектров БО для двух поляризаций начинает отличаться. В области углов $\theta \sim 30^\circ$ в s-поляризованных спектрах отражения появляются дополнительные, более коротковолновые максимумы (рис.3(a)). Интенсивность этих максимумов постепенно нарастает, и в диапазоне $q \approx 35^\circ \div 50^\circ$ спектры приобретают ярко выраженный дублетный характер. При углах падения вблизи $\theta_* \approx 52^\circ$ длинноволновый максимум исчезает, и в спектре остается лишь коротковолновый максимум, сдвигающийся в сторону больших энергий при дальнейшем увеличении углов падения. Таким образом, возникающая при относительно малых углах падения дублетная форма спектров БО резко пропадает в области углов θ_* . В p-поляризации ситуация обратная. В области углов падения, для которых в s-поляризации дублетная структура исчезает, в p-поляризации она наоборот появляется – то есть, в s-поляризации дублетная структура проявляется в области углов меньших θ_* ,

а в р-поляризации - в области углов больших θ_* . Следует отметить, что при больших углах падения ($\geq \sim 60^\circ$) в s-поляризованных спектрах БО вновь появляется длинноволновый максимум. Относительная интенсивность этого максимума мала, он расположен на сплошном фоне рассеянного света, а его полуширина заметно превышает полуширину максимумов отражения, соответствующих малым углам падения. Предполагается, что этот максимум связан с вкладом в регистрируемый в направлении зеркального отражения сигнал волн, дифрагированных в других направлениях и упруго рассеянных на дефектах ФК.

Представленные на рис.3(с) зависимости спектрального положения максимумов БО от угла падения света позволяют выделить две ветви, которые отделены друг от друга областями “антипересечения” (avoiding crossing area [6]). При этом протяженность области антипересечения для р-поляризации (~ 50 meV) более чем в два раза меньше протяженности этой области для s-поляризованного света (~ 120 meV). Характер угловых зависимостей для инвертированного опала-GaN полностью идентичен характеру зависимостей, представленных на рис.3(с). Единственное отличие заключается в большей протяженности областей антипересечения для инвертированного опала-GaN (~ 90 meV и ~ 260 meV). Для кристаллов GaP характер угловых зависимостей поведения наблюдаемых максимумов БО во всем диапазоне углов аналогичен поведению, представленному на рис.3, для области углов меньших θ_* .

При изменении азимутального положения исследуемых образцов обнаружено изменение формы и соотношения интенсивностей компонент в дублетных спектрах БО. Азимутальное положение характеризуется величиной азимутального угла ϕ , который при фиксированном угле падения света на образец изменяется за счет вращения образца вокруг нормали к его поверхности. На рис.4 представлена зависимость от угла ϕ величины B , измеренной при угле падения $\theta = 35^\circ$ для s-поляризованных спектров инвертированного опала-GaN. Величина B измерялась как отношение интенсивности коротковолнового максимума к интенсивности длинноволнового

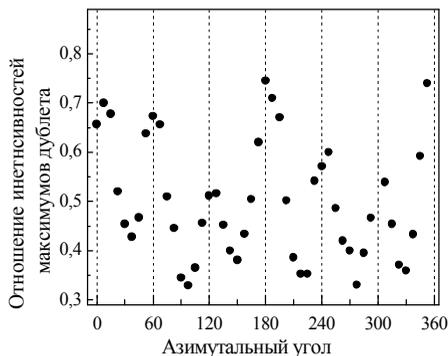


Рис.4. Зависимость отношения B от азимутального угла для спектров БО фотонного кристалла GaN, измеренных при фиксированном угле ($\theta = 35^\circ$) падающего на образец s-поляризованного света.

максимума. Рис.4 показывает, что величина отношения V изменяется периодическим образом с периодом равным 60° . Следует отметить, что спектры, приведенные на рис.1–3, измерялись при азимутальных углах, соответствующих максимальному проявлению дублетных структур (максимальное значение величины V в области антипересечения).

Для качественного объяснения полученных результатов используются схемы, представленные на рис.5. Эти схемы соответствуют сечению первой зоны Бриллюэна для ГЦК структуры, проходящему через высокосимметричные точки Γ , L , U , K . Поскольку поверхность образца совпадает с ростовой плоскостью (111) , зона Бриллюэна на схеме ориентирована так, чтобы плоскость, содержащая точки U, L, K, W , была параллельна поверхности образца. Волновой вектор k_{in} соответствует волновому вектору падающей на образец электромагнитной волны внутри кристалла. Вектор k_r является волновым вектором основной волны, дифрагированной на ростовых плоскостях (111) . Переход от схемы, представленной на рис.5а, к схеме рис.5(б) соответствует азимутальному повороту кристалла на 60° . При малых углах падения, когда конец волнового вектора k_{in} смещается от точки $-L$ в направлении точек $-U$ (а) или $-K$ (б), возникает основная брэгговская волна, соответствующая дифракции на плоскостях (111) . Когда вектор k_{in} попадает в точку $-U$ ($-K$), создается ситуация, при которой условие брэгговской дифракции выполняется не только для волн, отраженных от плоскостей (111) , но одновременно, и для волн, отраженных от плоскостей (200) для азимутальной ориентации представленной на рис.5(а), а в случае ориентации, представленной на рис.5(б), одновременно и для волн, отраженных от наклонных к поверхности образца плоскостей $(11\bar{1})$. То есть, возникает ситуация, соответствующая МБД.

Волны, дифрагированные на плоскостях $(11\bar{1})$ и (200) , распространяются в направлении волновых векторов k_r' . Эти направления существенно отличаются от направления зеркального отражения - направления, в котором осуществляется регистрация спектров БО. В этой связи появление дополнительных максимумов в спектрах БО вряд ли можно рассматривать как проявление волн, дифрагированных на плоскостях (200) или $(11\bar{1})$ [6]. Вместе с тем, в направлении зеркального отражения могут распространяться волны, испытавшие двойную дифракцию. Волна, дифрагированная на плоскостях (200) , может повторно дифрагировать на наклонных плоскостях $(11\bar{1})$ (рис.5(а)), а волна, дифрагированная на плоскостях $(11\bar{1})$, может повторно дифрагировать на плоскостях (200) (рис.5(б)). Как показывает рис.5 волновой вектор k_r'' таких дважды дифрагированных волн совпадает с волновым вектором k_r' основного луча, дифрагированного на ростовых плоскостях (111) . Такое

совпадение, по-видимому, должно приводить к максимальной степени взаимодействия волн и появлению дополнительных максимумов БО в направлении зеркального отражения.

Основное отличие процесса двойной дифракции для двух геометрий, представленных на рис.5(a) и рис.5(b), связано с последовательностью процессов отражения. Представление двойной дифракции в виде последовательности одиночных процессов используется, в основном, в целях наглядной иллюстрации [7]. На самом деле процесс двойной дифракции является единым динамическим процессом, в котором одновре-

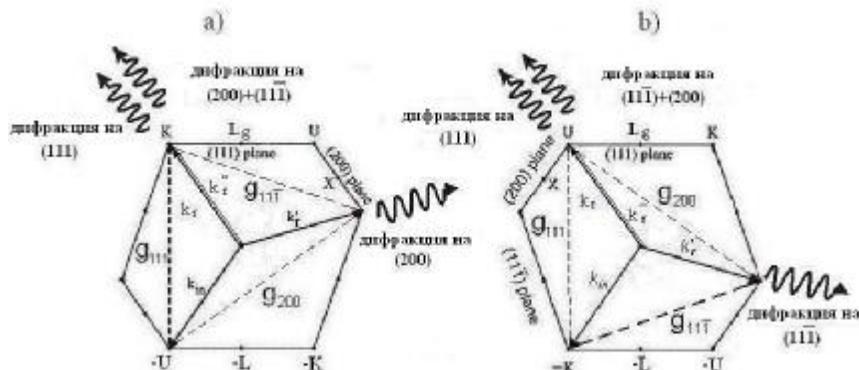


Рис. 5. Схема геометрии многоволновой Брэгговской дифракции.

менно участвуют обе рассматриваемые системы кристаллографических плоскостей. В результате получается, что обе ориентации, представленные на рис.5 для процессов двойной дифракции, являются фактически эквивалентными. Если это так, то становится понятным факт максимального проявления дублетной структуры при изменении азимутального угла с периодом 60° (рис.4). Этот период соответствует переходу от геометрии, представленной на рис.5(a), к геометрии, соответствующей рис.5(b). В этих геометриях волновой вектор основной волны, лежащий в плоскости падения компланарен с волновыми векторами обратной решетки, а, соответственно, и с волновыми векторами волн, дифрагированных на плоскостях (200) и $(11\bar{1})$. При промежуточных азимутальных углах компланарность нарушается, что уменьшает силу взаимодействия между дифрагированными волнами и, как следствие, приводит к уменьшению интенсивности дополнительных максимумов (рис.4).

Обнаруженные отличия проявления МБД для s- и p- поляризаций объясняются с одной стороны зависимостью амплитуды p-поляризованной волны от угла рассеяния, а с другой стороны разницей в изменении

соотношения фаз взаимодействующих волн при прохождении области антипересечения.

Глава 6 посвящена характеристике ФК на основе композитов опал-полупроводник по спектрам брэгговского отражения.

С целью получения предварительной информации о геометрических и диэлектрических параметрах исходных опаловых матриц, были измерены спектры БО света от исходных, незаполненных опалов и от опалов, поры которых заполнялись водой или глицерином (жидкостями с хорошо известными значениями диэлектрических постоянных). Такое заполнение существенно снижает диэлектрический контраст пространственно-периодической среды, в результате пики брэгговского отражения становятся значительно более узкими по сравнению с пиками отражения от исходного опала. Это обстоятельство позволяет, с одной стороны, с хорошей точностью находить спектральные положения центров ФЗЗ, а с другой стороны, обоснованно пользоваться при анализе экспериментальных данных законом Брэгга для дифракции электромагнитных волн. С помощью этого закона из анализа зависимостей положения наблюдаемых максимумов от угла падения света определены основные параметры исходных опалов: d_{111} - период кристаллической решетки вдоль направления [111]; f_0 - фактор заполнения структуры материалом шаров; e_a - диэлектрическая проницаемость материала шаров.

При анализе формы наблюдаемых спектров БО за основу была принята модель кристалла в виде ГЦК решетки, в узлах которой размещены шары из диэлектрического материала. В модели учитывались эффекты, связанные со спеканием (взаимопроникновением) структурных элементов – шаров (сфер SiO_2) - и их возможной одноосной деформацией вдоль направления [111] роста структуры, превращающей шары в эллипсоиды. Количественный расчет спектральных контуров БО проводился в рамках приближения слоисто-периодической среды с усреднением диэлектрической проницаемости в направлениях, параллельных поверхности. Расчеты проводились при варьировании значений основных параметров теории: a_{00} - расстояние между центрами сфер SiO_2 , h - коэффициент сжатия сфер, c - коэффициент спекания сфер, f_m - коэффициент заполнения пор опала веществом, e'' - мнимая часть диэлектрической проницаемости, учитывающая потери света. На рис.6 пунктиром представлены теоретические спектры для малых ($\theta \approx 10^0$) углов падения s-поляризованного света. В процессе подгонки удается получить единственный оптимальный набор численных значений приведенных параметров, поскольку при анализе экспериментальных кривых приходится согласовывать в рамках единой модели довольно широкий круг

количественных и качественных характеристик спектров. Полученные значения параметров исследованных образцов представлены в таблице 1.

Использованное планарное приближение фактически соответствует модели одномерного ФК. В рамках такого приближения невозможно определить значения параметров a_{00} и h по отдельности. Находится лишь пространственный период $d_{111} = a_{00}h\sqrt{2/3}$, в который входит произведение $a_{00}h$. Учет трехмерности структуры ФК и её связи с возможной деформацией сфер SiO_2 выполнен с использованием длины волны λ^* и угла падения света θ^* , которые соответствуют геометрии выполнения условий многоволновой брэгговской дифракции света (рис.5). Как показано в [8]

величины λ^* и θ^* однозначным образом связаны с величинами a_{00} и h через соотношение, являющееся структурным инвариантом для опалоподобного ФК:

$$\lambda^* = 4a_{00}\sqrt{3} \text{Sin}\theta^*/(4 - \eta^2) \quad (1).$$

Представленные в таблице 1 значения параметров a_{00} и h получены с использованием соотношения (1) и экспериментально измеренных величин I^* и q^* . Таким образом, исследование многоволновой брэгговской дифракции дает уникальную возможность для характеристики реальной трехмерной структуры фотонных кристаллов.

Полученные значения η указывают на довольно заметное анизотропное сжатие шаров $\alpha\text{-SiO}_2$. Учет такого сжатия имеет принципиальное значение, поскольку сжатие приводит к изменению симметрии ГЦК решетки опалоподобных ФК, а это, в принципе, может заметным образом изменить установленные к настоящему моменту особенности зонной структуры таких ФК.

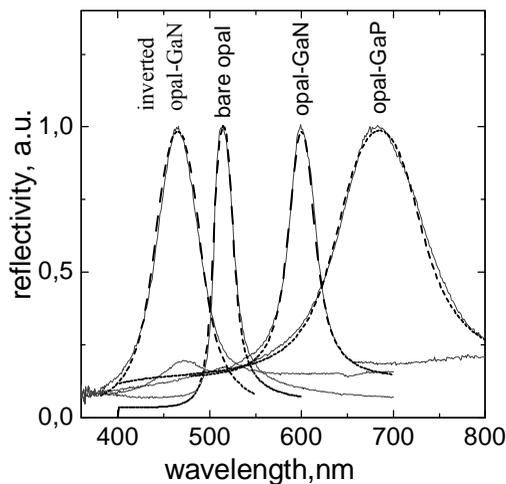


Рис.6. Спектры брэгговского отражения s-поляризованного света от композитов опал-полупроводник, полученные при угле падения $\theta \approx 10^\circ$. Пунктиром представлены теоретически рассчитанные спектры БО света для данного угла.

Коэффициенты спекания χ для опалов, заполненных полупроводниками, превышают соответствующие величины для исходных опалов. Как видно из таблицы 1, для композита опал- GaN получилось максимальное значение коэффициента спекания χ . Поскольку температура синтеза для этого композита также была максимальной, сделан вывод о влиянии температурного воздействия на величину коэффициента χ . Для ко-

Таблица 1. Экспериментальные и рассчитанные параметры исследованных фотонных кристаллов

Sample	Experimental parameters			Theoretical (Fitting) parameters			
	λ_* , nm	θ_* , deg	a_{00} , nm	χ	η	f_m	ϵ''
Bare opal	443	45	257	0.02	0.93	1	0.048
Opal-GaN	530	47	277.	0.05	0.90	0.67	0.092
Inverted opal-GaN	413	38	271.	0.05	0.91	0.7	0.090
Opal-GaP	---	---	271	0.03	0.92	0.87	0.24

-личественной оценки влияния температуры отжига как на коэффициенты спекания, так и на другие параметры опалов, было проведено специальное исследование воздействия температурного отжига на спектры БО синтетических опалов. Исследовались спектры исходных образцов и образцов, подверженных температурному отжигу.

Количественная оценка параметров выполнена с помощью анализа угловых зависимостей положения максимумов брэгговского отражения незаполненных образцов и образцов, заполненных глицерином. Обнаружено, что максимальная температура отжига (1050°C) приводит к десятикратному увеличению степени спекания сфероидов. Как следствие, уменьшается (более чем на 10%) расстояние между ними, увеличивается (от 0.75 до 0.96) коэффициент заполнения структуры сфероидами, а также увеличивается эффективная диэлектрическая проницаемость опала в целом (от 1.74 до 2.08). Обнаружено также, что спекание происходит не только между сфероидами, но и внутри самих сфероидов между наночастицами $\alpha\text{-SiO}_2$, из которых они состоят. Это спекание заметно (на $\sim 7\%$) увеличивает диэлектрическую проницаемость сфероидов.

Основные результаты и выводы.

1. Продемонстрирована возможность создания высококонтрастных трехмерных фотонных кристаллов на основе композитов опал-полупроводник с использованием перспективных полупроводников GaN, GaP и твердого раствора GaPN.

2. В спектрах люминесценции композитов опал-GaPN обнаружено уменьшение интенсивности электронно-дырочной рекомбинации за счет влияния фотонной запрещенной зоны, что указывает на принципиальную возможность использования структур опал-GaPN для управления характеристиками спонтанного излучения.

3. Выполнено детальное исследование спектров брэгговского отражения (БО) света от фотонных кристаллов, изготовленных на основе синтетических опалов: композитов опал-полупроводник (поры опала заполнены полупроводниками GaN и GaP) и GaN-инвертированных структур (опаловая матрица удалена из композита опал-GaN). Продемонстрированы новые возможности использования спектроскопии БО для характеристики опалоподобных структур. Разработан метод количественного анализа формы спектров, основанный на приближении планарной слоисто-периодической среды, учитывающий эффекты спекания опаловых сфер SiO₂ и их одноосную деформацию. Для дополнительной характеристики исследованных образцов использованы структурные инварианты, устанавливающие связь между параметрами решетки ФК и положениями особенностей в спектрах многоволновой брэгговской дифракции.

4. В широком диапазоне углов падения как для s-, так и для р-поляризованного света, в спектрах брэгговского отражения высококонтрастного композита опал-GaN и соответствующего ему инвертированного опала обнаружена дублетная структура. В угловой зависимости положения максимумов компоненты дублета образуют области антипересечения, энергетическая протяженность которых для s-поляризации более чем в два раза превышает протяженность аналогичных областей для р-поляризации. Анализ полученных угловых зависимостей, а также анализ зависимости наблюдаемых спектров от азимутального положения образцов, позволил объяснить появление дублетной структуры как результат взаимодействия основной волны, дифрагированной на плоскостях (111) параллельных поверхности, с дифрагированной волной, соответствующей двойному отражению от наклонных к поверхности плоскостей (11 $\bar{1}$) и (200).

5. Исследовано влияние температурного отжига на спектры БО синтетических опалов. На основании анализа измеренных спектров определена зависимость параметров опалов от температуры отжига. Установлено, что температурный отжиг приводит к взаимопроникновению

друг в друга структурных элементов опалов. Максимальная температура отжига более чем в десять раз увеличивает степень спекания сфероидов. Как следствие, уменьшается расстояние между ними, увеличивается коэффициент заполнения структуры сфероидами и эффективная диэлектрическая проницаемость опала в целом. Спекание происходит не только между сфероидами, но и внутри самих сфероидов между наночастицами α -SiO₂, из которых они состоят. Это спекание увеличивает диэлектрическую проницаемость сфероидов.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. G. Gajiev, V. G. Golubev, D. A. Kurdyukov, A. B. Pevtsov, A. V. Selkin, and V. V. Travnikov. "Three-Dimensional GaN Photonic Crystals". Phys. Stat. Sol., (b) **231**, R7 (2002).
2. Г.М. Гаджиев, В.Г. Голубев, М.В. Заморянская, Д.А. Курдюков, А.В. Медведев, J. Merz, A. Mintairov, А.Б. Певцов, А.В. Селькин, В.В. Травников, Н.В. Шаренкова. "Фотонные кристаллы на основе композитов опал-GaP и опал-GaPN: получение и оптические свойства". ФТП, **37**, 1449 (2003).
3. Г.М. Гаджиев, В.Г. Голубев, Д.А. Курдюков, А.Б. Певцов, А.В. Селькин, В.В. Травников, "Характеризация фотонных кристаллов на основе композитов опал-полупроводник по спектрам брэгговского отражения света". ФТП, **39**, 1423 (2005).
4. G. Gajiev, V. G. Golubev, D. A. Kurdyukov, A. B. Pevtsov, A. V. Selkin, and V. V. Travnikov. "Bragg reflection spectroscopy of opal-like photonic crystals". Phys. Rev. B., **72**, 205115 (2005).
5. G.M. Gajiev, D.A. Kurdyukov and V.V. Travnikov. "Effect of annealing on parameters of synthetic opal." Nanotechnology, **17**, 5349 (2006).
6. G.Gadjiev, V.G.Golubev, D.A.Kurdyukov, A.B.Pevtsov, V.V.Travnikov. "Three-dimensional GaN photonic crystals for visible spectral range". Abstracts 10th Int.Symp. "Nanostructures: Physics and Technology", St. Petersburg, June, 2002, p.134.
7. Г.М. Гаджиев, А.Б. Батдалов, В.Г. Голубев, Д.А. Курдюков, В.В. Травников, А.Б. Певцов. "Фотонные кристаллы на основе композитов опал-GaN(P): получение и фотонно-кристаллические свойства". Сб. трудов международной конференции. "Фазовые переходы, критические явления в конденсированных средах". Махачкала, 11-14 сентября 2002, стр.175.
8. G.M.Gajiev, V.G.Golubev, D.A.Kurdyukov, A.V.Medvedev, A.B.Pevtsov, A.V.Sel'kin, V.V.Travnikov, J.Merz, A.Mintairov. "Opal-GaP(N) based photonic crystals: fabrication and optical properties". MRS Fall Meeting, Boston, USA, 2002, p.361.
9. Г.М. Гаджиев, В.Г. Голубев, В.Ю. Давыдов, Д.А. Курдюков, А.В. Медведев, А.Б. Певцов, В.В. Травников. "Фотонные кристаллы на основе

нанокомпозитов опал-GaP(N): получение, структурные и фотонно-кристаллические свойства”. Сборник трудов III Международной конференции, "Аморфные и микрокристаллические полупроводники". С.-Петербург, 2002, стр.9.

10. Г.М. Гаджиев, В.Г. Голубев, М.В. Заморянская, Д.А. Курдюков, А.В. Медведев, J. Merz, Ф. Минтаиров, А.Б. Певцов, А.В. Селькин, В.В. Травников, Н.В. Шаренкова. “Влияние фотонной запрещенной зоны на фотолюминесценцию и отражение композитов опал-GaP и опал-GaPN”. VI Всероссийская конференция по физике полупроводников. С.-Петербург, 26-31 октября, 2003, стр. 451.

11. Gajiev G.M., Golubev V.G., Kurdyukov D.A., Medvedev A.V., Pevtsov A.B., Sel'kin A.V., Travnikov V.V. “Bragg reflection spectra of opal-based semiconductor photonic crystals: experiment and numerical simulation”. 12th International Symposium “NANOSTRUCTURES: Physics and Technology” St. Petersburg, 21-25 June, 2004, p.107.

12. Г.М. Гаджиев, В.Г. Голубев, Д.А. Курдюков, А.В. Медведев, А.Б. Певцов, А.С. Селькин, В.В. Травников. “Спектроскопия брэгговского отражения света фотонных кристаллов на основе композитов опал-полупроводник”. Материалы XI Международной научно-технической конференции, Москва, МГТУ им. П.Э.Баумана, 2005, 8-10 сентября, Стр.81.

Цитированная литература.

1. E. Yablonovitch. Phys. Rev. Lett., **58**, 2059 (1987).
2. S. John. Phys. Rev. Lett., **58**, 2486 (1987).
3. E. Yablonovich, T.J. Gmitter. Phys. Rev. Lett., **63**, 1950 (1989).
4. V.N. Astratov, V.N. Bogomolov, A.A. Kaplyanskii, A.V. Prokofiev, L.A. Samoilovich, S.M. Samoilovich, Yu.A. Vlasov. Nuovo Gimento **17D**, 1349 (1995).
5. S. Nakamura and G. Fasol. The blue Laser Diode: GaN based Light Emitters and Lasers (Berlin, Springer, 1997).
6. H.M. Van Driel, W.L. Vos. Phys. Rev. B **62**, 9872 (2000).
7. D.A. Kottwitz. Phys. Rev., **175**, 1056 (1968).
8. A.V. Sel'kin. Proc. of 12th Int. Symp. “Nanostructures: Physics and Technology”, St. Petersburg, Russia, June 21-25, 2004, 111-112 (2004).