

На правах рукописи



ПОДДУБНЫЙ АЛЕКСАНДР НИКИТИЧ

**ТЕОРИЯ РЕЗОНАНСНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ И
КВАЗИКРИСТАЛЛОВ**

Специальность 01.04.10 – физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2010

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук
Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор Ивченко Е. Л.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор Кочерешко В. П.,
Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе

доктор физико-математических наук, профессор Глинский Г. Ф.,
Санкт-Петербургский государственный электротехнический универси-
тет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина).

Ведущая организация: Учреждение Российской академии наук
Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН

Защита состоится "16" декабря 2010 г. в 12 часов 00 минут на
заседании диссертационного совета Д 002.205.02 при Учреждении
Российской академии наук Физико-технический ин-
ститут им. А. Ф. Иоффе РАН по адресу: 194021, Санкт-Петербург,
ул. Политехническая, 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Рос-
сийской академии наук Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе
РАН.

Автореферат разослан "10" ноября 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук



Сорокин Л. М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В последнее десятилетие физика фотонных кристаллов превратилась в одну из наиболее быстро развивающихся областей современной физики [1, 2, 3, 4]. Проводятся нацеленные на эффективное управление оптическим излучением фундаментальные и прикладные исследования таких структур, в которых диэлектрическая проницаемость изменяется в пространстве периодически и наблюдается брэгговская дифракция света. Одновременно растет интерес к изучению фотонных квазикристаллов [5, 6]. Эти структуры неперiodичны, но в них существует дальний порядок и также возможна брэгговская дифракция. Свойства структур определяются геометрическими параметрами и диэлектрической проницаемостью композиционных материалов. В зависимости от числа направлений, в которых периодична (квазипериодична) диэлектрическая проницаемость среды, выделяют одномерные, двумерные и трехмерные фотонные кристаллы (квазикристаллы). Простейшей реализацией одномерного фотонного кристалла является структура, состоящая из двух периодически чередующихся материалов А и В с разными диэлектрическими постоянными. Квазикристаллические структуры не ограничены требованием периодичности, что приводит к их большему разнообразию по сравнению с традиционными фотонными кристаллами. Поэтому в квазикристаллах легче достигаются требуемые оптические свойства, например полная фотонная запрещенная зона [5]. С другой стороны, благодаря промежуточному положению квазикристаллов между периодическими и неупорядоченными системами возникает ряд новых фундаментальных задач о распространении света в неоднородных средах.

В особый класс выделяются *резонансные* фотонные кристаллы и квазикристаллы, в которых по крайней мере один из композиционных материалов характеризуется резонансным оптическим откликом. Резонансы могут проявляться при взаимодействии света с квазичастичными возбуждениями в компонентах структуры, такими как полупроводниковые экситоны и плазмоны. Контролируя спектральные положения и амплитуды резонансов внешними воздействиями, например, элек-

трическим полем, можно управлять оптическими свойствами структур. Это открывает перспективы использования резонансных фотонных кристаллов и квазикристаллов в качестве перестраиваемых оптических устройств.

Цель настоящего исследования заключается в теоретическом изучении оптических спектров фотонных кристаллов и квазикристаллов, в которых диэлектрический отклик композиционных элементов является резонансной функцией частоты света.

Научная новизна работы состоит в решении конкретных задач:

1. Построить теорию экситонных поляритонов в одномерных, двумерных и трехмерных фотонных кристаллах на основе квантовых ям, проволок и точек в диэлектрической матрице с учетом резонансной пространственной дисперсии диэлектрической проницаемости композиционных материалов.
2. Исследовать спектры отражения, пропускания и поглощения света высококонтрастными фотонными кристаллами; проанализировать изменение спектров при переходах “полупроводник-металл” и “металл-сверхпроводник”.
3. Построить теорию оптических спектров квазикристаллических структур из квантовых ям и квантовых точек вблизи частоты экситонного резонанса.
4. Разработать приближенную аналитическую теорию, позволяющую описывать спектральное положение запрещенных зон в фотонных кристаллах и квазикристаллах.

Практическая значимость работы состоит в том, что в ней впервые рассчитаны зонная структура и спектры отражения, пропускания и дифракции одномерных, двумерных и трехмерных резонансных фотонных кристаллов с учетом пространственной дисперсии диэлектрической проницаемости и диэлектрического контраста; теоретически исследовано температурное поведение оптических спектров фотонных кристаллов на основе композитов опал-VO₂ и на основе сверхпроводников; исследована брэгговская дифракция света в резонансных фотонных квазикристаллах. В работе развиты новые эффективные подходы к рас-

чету оптических спектров. Особое внимание уделено построению аналитических методов. Сопоставление полученных результатов с экспериментальными данными позволяет определять резонансные частоты, излучательные и безызлучательные затухания низкоразмерных экситонов в полупроводниковых структурах.

Основные положения выносимые на защиту:

1. Двойная дифракция и полное внутреннее отражение от границы могут приводить к многократному увеличению коэффициента зеркального отражения света от фотонных кристаллов.
2. Приближение эффективной среды для пор решетки опала позволяет описывать основные оптические свойства высококонтрастных фотонных кристаллов на основе композитов опал-VO₂.
3. Оптические спектры сверхпроводящих фотонных кристаллов характеризуются интерференционными осцилляциями, которые подавляются внешним магнитным полем или с увеличением температуры.
4. В квазикристаллических структурах с квантовыми ямами, настроенных на условие резонансного брэгговского отражения, в зависимости от числа ям проявляются два режима: сверхизлучательный и фотонно-квазикристаллический.
5. Спектр отражения света от двумерного массива квантовых точек, расположенных в узлах мозаики Пенроуза, имеет двухпиковую структуру, отсутствующую в периодической решетке.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на международных конференциях “Nanostructures: Physics and Technology” (Санкт-Петербург, 2006, 2010; Новосибирск, 2007), российско-швейцарском семинаре “Excitons and Exciton Condensates in Confined Semiconductor Systems” (Москва, 2006), международной конференции “Optics of Excitons in Confined Systems” (Патти, Италия, 2007), международной школе “International School on Nanophotonics” (Марatea, Италия, 2007), международной конференции “Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures” (Токио, Япония, 2008), международной конференции “Physics of Quantum Electronics” (Сноуберд, США, 2009), IX Российской

конференции по физике полупроводников (Новосибирск, Томск, 2009), школе “Актуальные проблемы физики конденсированного состояния” (Зеленогорск, 2010), на семинарах ФТИ им. А.Ф. Иоффе, университета г. Саутгемптона (Великобритания), университета г. Регенсбурга (Германия) и Электронного Синхротрона Германии в Гамбурге.

Публикации. По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликовано 11 печатных работ, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Она содержит 124 страницы текста, включая 22 рисунка. Список цитируемой литературы содержит 157 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность проведенных исследований, сформулированы цель и научная новизна работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту, а также кратко изложено содержание диссертации.

Первая глава “Экситонные поляритоны в фотонных кристаллах” посвящена исследованию экситон-поляритонной зонной структуры и оптических спектров одномерных, двумерных и трехмерных фотонных кристаллов.

В §1.1 дано определение и классификация резонансных фотонных кристаллов. Представлен краткий обзор современного состояния исследований различных типов структур с экситонными резонансами. Особое внимание уделено конкретной реализации таких систем — резонансным брэгговским структурам из квантовых ям [7, 8]. Введено понятие резонансного брэгговского условия

$$\frac{\omega_0}{c} n_b d = \pi h, \quad h = 1, 2, \dots, \quad (1)$$

связывающего частоту экситонного резонанса ω_0 и период структуры d . В формуле (1) n_b — фоновый показатель преломления материала квантовых ям и барьеров, c — скорость света в вакууме. Условие (1) обес-

печивает конструктивную интерференцию волн, отраженных от различных квантовых ям на частоте экситонного резонанса. Это приводит к сверхизлучательному усилению коэффициента отражения света от структуры в целом. Результаты теории сопоставлены в §1.1.2 с недавними экспериментальными исследованиями оптических свойств гетероструктур GaAs/AlGaAs [9]. Отметим, что в этих системах экситон в квантовых ямах является квазидвумерным, так что пространственная дисперсия диэлектрической проницаемости материала ям не проявляется.

В §1.2 сформулированы основные уравнения, описывающие рассматриваемые в первой главе фотонные кристаллы и учитывающие пространственную дисперсию диэлектрической проницаемости. Изучаемые структуры представляют собой периодически расположенные полупроводниковые слои, цилиндры или шары из материала А, помещенные в диэлектрическую матрицу из материала В и образующие периодическую решетку с периодом d . Ширина слоев a , а также радиусы цилиндров и шаров R выбирались значительно превосходящими боровский радиус экситона в объемном материале А, так что в каждом отдельном слое, шаре или цилиндре у экситона сохраняется трехмерный характер относительного движения электрона и дырки, а его движение как целого квантуется по нормали к границе между материалами А и В. С другой стороны, величины $2R$ и a были меньше постоянной решетки d , чтобы квантово-механическим туннелированием можно было пренебречь. В диэлектрической проницаемости объемного материала А

$$\varepsilon_A(\omega, \mathbf{q}) = \varepsilon_a + \frac{\varepsilon_a \omega_{\text{ЛТ}}}{\omega_{\text{exc}}(\mathbf{q}) - \omega}, \quad \omega_{\text{exc}}(\mathbf{q}) = \omega_0 + \frac{\hbar q^2}{2M}, \quad (2)$$

учитывается как частотная, так и пространственная дисперсия, т.е. зависимость и от частоты света ω , и от его волнового вектора \mathbf{q} . Здесь ω_0 , $\omega_{\text{ЛТ}}$ и M — резонансная частота, продольно-поперечное расщепление и трансляционная эффективная масса триплетного $1s$ -экситона в материале А, а ε_a — фоновая диэлектрическая проницаемость, описывающая вклад в диэлектрический отклик всех остальных электронно-дырочных возбуждений. Величина ε_a может отличаться от диэлектри-

ческой проницаемости матрицы ε_b , что является проявлением диэлектрического контраста. Таким образом, рассматриваемая система описывается двумя векторными уравнениями: уравнением для электрического поля $\mathbf{E}(\mathbf{r})$

$$\text{rot rot } \mathbf{E}(\mathbf{r}) = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 [\varepsilon(\mathbf{r})\mathbf{E}(\mathbf{r}) + 4\pi\mathbf{P}_{\text{exc}}(\mathbf{r})] \quad (3)$$

и материальным уравнением для экситонного вклада $\mathbf{P}_{\text{exc}}(\mathbf{r})$ в диэлектрическую поляризацию на частоте ω

$$\left(-\frac{\hbar}{2M}\Delta + \omega_0 - \omega\right)\mathbf{P}_{\text{exc}}(\mathbf{r}) = \frac{\varepsilon_a\omega_{\text{LT}}}{4\pi}\mathbf{E}(\mathbf{r}), \quad (4)$$

где $\varepsilon(\mathbf{r}) = \varepsilon_a$ в материале А и $\varepsilon(\mathbf{r}) = \varepsilon_b$ в материале В. Уравнения (3) и (4) решаются со стандартными граничными условиями на поверхности, разделяющей материалы А и В: непрерывность тангенциальных составляющих электрического и магнитного полей, и граничные условия Пекара для экситонной поляризации.

В §1.3 проанализирована роль пространственной дисперсии диэлектрической проницаемости для одномерного фотонного кристалла, состоящего из полупроводниковых слоев толщиной a , разделенных барьерами. Число размерно-квантованных состояний экситона, взаимодействующих со светом заданной частоты, определяется соотношением между продольно-поперечным расщеплением $\hbar\omega_{\text{LT}}$ и характерной энергией размерного квантования $\hbar^2\pi^2/(2Ma^2)$, зависящей от эффективной трансляционной массы экситона M . В предельном случае $M \rightarrow 0$ взаимодействие света с различными размерно-квантованными состояниями можно рассматривать неза-

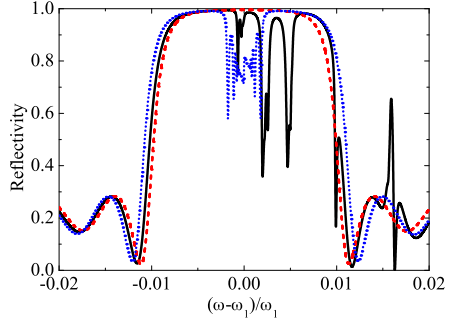


Рис. 1: Спектры отражения резонансной периодической структуры с широкими квантовыми ямами для различных значений эффективной массы экситона M . Штриховая, сплошная и пунктирные кривые рассчитаны для $M = 0.01m_0$, $M = 0.5m_0$ и $M \rightarrow \infty$, соответственно, где m_0 — масса свободного электрона.

висимо. В противоположном предельном случае ($M \rightarrow \infty$) свет взаимодействует со всеми состояниями одновременно. Спектры отражения для структур с различными значениями M , в которых брэгговское условие (1) выполняется на частоте $\omega_1 = \omega_0 + \hbar\pi^2/(2Ma^2)$, приведены на рис. 1. Рисунок демонстрирует, что плавная составляющая всех спектров хорошо описывается штриховой кривой ($M \rightarrow 0$), т.е. определяется взаимодействием света и экситона с энергией $\hbar\omega_1$, соответствующей основному уровню размерного квантования. Такое поведение связано с наибольшей силой осциллятора для основного перехода.

Параграф 1.4 посвящен особенностям двумерных резонансных фотонных кристаллов. Изложены детали модели и метода расчета. Показано, что расчет двумерных структур требует использования сложных численных методов и наиболее эффективным для рассматриваемых структур является метод Корринги-Кона-Ростокера (ККР). Расчет оптических спектров и зонной структуры экситонных поларитонов методом ККР показывает, что основные выводы, сделанные в §1.3 для одномерных структур, справедливы и для двумерных фотонных кристаллов. Кроме того, в §1.4.2 показано, что дифракция света внутри фотонного кристалла и отражение от его внутренней границы могут приводить к существенному увеличению коэффициента зеркального отражения. Этот эффект качественно пояснен на рис. 2. Волна с волновым вектором \mathbf{q}_0 , нормально падающая из вакуума на двумерный фотонный кристалл, может испытать брэгговскую дифракцию с образованием двух симметрично распространяющихся волн с волновыми векторами \mathbf{q}_1 и \mathbf{q}'_1 . На границе структуры эти волны испытывают полное внутреннее отражение с образованием волн \mathbf{q}_2 и \mathbf{q}'_2 , соответственно. Для волн \mathbf{q}_2 и \mathbf{q}'_2 также выполняется условие дифракции Брэгга, приводящее к образованию интенсивной зеркально отраженной волны \mathbf{q}_3 . Такой дифракционный механизм зеркального отражения носит общий характер и может про-

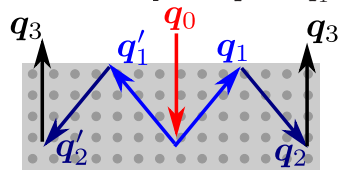


Рис. 2: Схематическая иллюстрация дифракционного механизма отражения света от фотонного кристалла.

являться как в резонансных, так и в нерезонансных двумерных и трехмерных структурах.

Параграф 1.5 посвящен исследованию зонной структуры трехмерных резонансных фотонных кристаллов из квантовых точек, расположенных в узлах гранцентрированной кубической (ГЦК) решетки. Расчет выполнен с помощью метода ККР. Дисперсионные кривые экситонных поляритонов в ГЦК решетке приобретают существенно более сложный характер, чем в одномерных или двумерных структурах. Однако качественные результаты, полученные для одномерных структур, применимы и к ГЦК решетке. В частности в §1.5 показано, что положение нижних ветвей дисперсионной кривой поляритонов определяется главным образом взаимодействием света с экситоном на основном уровне размерного квантования в квантовых точках.

Краткие итоги главы 1 обобщены в §1.6.

Вторая глава “Высококонтрастные переключаемые фотонные кристаллы” посвящена изучению влияния внешних воздействий на оптические свойства структур, в диэлектрической проницаемости которых проявляется плазмонный резонанс. Обзор исследований различных металло-диэлектрических фотонных кристаллов и метаматериалов приведен в §2.1.

В §2.2 изучены трехмерные фотонные кристаллы на основе ГЦК матрицы из синтетического опала, поры в которой заполнены диоксидом ванадия. Особенность соединения VO_2 состоит в наличии фазового перехода из полупроводниковой в металлическую фазу при превышении температурой значения 68°C , приводящего к резкому изменению диэлектрической проницаемости. Это позволяет создавать фотонно-кристаллические композиты опал- VO_2 с переключаемым положением фотонной стоп-зоны [10]. В данном параграфе исследованы оптические спектры композита опал- VO_2 в области длин волн $\lambda = 1.3 \div 1.6$ мкм, актуальной для телекоммуникационных применений. Существенной сложностью теоретического описания системы опал- VO_2 является то, что в реалистичных структурах поры в матрице опала не полностью заполнены VO_2 , и распределение VO_2 в порах сильно неоднородно. Прове-

дено сравнение различных методов введения эффективной диэлектрической проницаемости пор. Показано, что оптимальным является приближение эффективной среды Бруггемана. Выполнен расчет спектров отражения и проведено сопоставление расчета с экспериментальными данными [A10]. Теоретические спектры отражения, рассчитанные с помощью трехмерного послойного метода ККР, удовлетворительно описывают экспериментальные спектры как в полупроводниковой, так и в металлической фазе VO_2 . Существенной особенностью диоксида ванадия в металлической фазе является большая величина мнимой части диэлектрической проницаемости. Спектры в металлической фазе определяются главным образом поглощением света в структуре. Поэтому, как демонстрируют выполненные расчеты, в исследуемой области длин волн $\lambda \sim 1.5$ мкм доля диоксида ванадия в порах опала f , при которой структура оптимальна для перестройки положения фотонных стоп-зон, ограничена сверху значением $f \sim 0.6$.

В §2.3 исследуется температурная зависимость оптических спектров сверхпроводящих фотонных кристаллов. Рассмотрена модель двумерных фотонных кристаллов, представляющая собой квадратную решетку сверхпроводящих цилиндров. Диэлектрическая проницаемость цилиндров описывается с помощью простейшей двухжидкостной модели Казимира-Гортера

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_{\text{P}}^2}{\omega} \left(\frac{f_s}{\omega} + \frac{1 - f_s}{\omega + i\gamma} \right), \quad (5)$$

где ω_{P} — плазменная частота, f_s и $1 - f_s$ — доли сверхпроводящей и нормальной компонент, а γ — феноменологическая константа затухания, описывающая релаксацию нормальной компоненты. При критической температуре T_c или критическом магнитном поле H_c сверхпроводящая фаза исчезает ($f_s = 0$) и диэлектрический отклик дается обычной формулой Друде, тогда как в противоположном пределе низкой температуры $f_s \rightarrow 1$ и отклик нормальной компоненты исчезает. Изучена зависимость оптических спектров от доли сверхпроводящей компоненты f_s .

На рис. 3 приведены спектры пропускания (а) и поглощения (б) в

области частот, соответствующей первой разрешенной зоне двумерного фотонного кристалла. Расчет для трех различных значений $f_s = 0, 0.5$ и 1 демонстрирует, что наличие нормальных электронов приводит к появлению поглощения и подавлению пропускания. В диссертации также развита простая аналитическая теория оптических спектров, позволяющая наглядно описывать результаты численного расчета методом ККР. Показано, что интерференционные пики пропускания на рис. 3(а) могут быть интерпретированы в терминах резонансного туннелирования световой волны через фотонный кристалл.

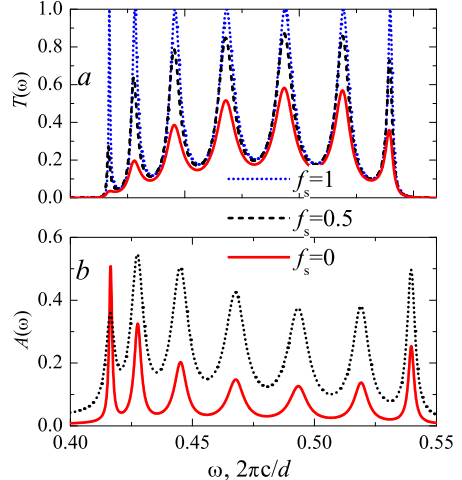


Рис. 3: Спектры пропускания (а) и поглощения (б) сверхпроводящего фотонного кристалла, рассчитанные для трех различных значений доли сверхпроводящей компоненты f_s . При $f_s = 1$ поглощение отсутствует и соответствующий спектр $A(\omega)$ совпадает с осью абсцисс. Частота ω отложена в единицах $2\pi c/d$, где d — постоянная решетки.

Основные результаты главы 2 обобщаются в §2.4.

Третья глава “Резонансные фотонные квазикристаллы” посвящена спектроскопии квазипериодических структур из квантовых ям и квантовых точек. Краткий обзор современного состояния теоретических и экспериментальных исследований фотонных квазикристаллов приведен в §3.1. Параграф 3.2 посвящен одномерным неперIODическим структурам на основе квантовых ям. Приведена классификация структур с различной последовательностью слоев, а также обсуждается их структурный фактор, характеризующий интенсивность брэгговской дифракции. Основное внимание уделено системам квантовых ям на основе последовательности Фибоначчи. Структура Фибоначчи \mathcal{F}_m порядка $m = 1, 2, \dots$ состоит из квантовых ям, разделенных барьерами двух типов, \mathcal{A} и \mathcal{B} , с толщинами a и b , соответственно. Последовательность барьеров определяется согласно рекуррентному соотношению $\mathcal{F}_1 = \mathcal{B}$,

$\mathcal{F}_2 = A$, $\mathcal{F}_{m+1} = \mathcal{F}_m \mathcal{F}_{m-1}$, так что $\mathcal{F}_3 = AB$, $\mathcal{F}_4 = ABA$, $\mathcal{F}_5 = ABAA$ и т.д. Это рекуррентное соотношение аналогично определению последовательности чисел Фибоначчи $F_1 = F_2 = 1$, $F_{m+1} = F_m + F_{m-1}$. Сформулировано резонансное брэгговское условие для последовательности Фибоначчи в виде

$$\frac{\omega_0 n_b \bar{d}}{c} \bar{d} = \pi \left(h + \frac{h'}{\tau} \right), \quad h, h' = 0, \pm 1, \pm 2 \dots, \quad (6)$$

обобщающее условие (1) на случай квазипериодических структур. В формуле (6) $\tau = (\sqrt{5} + 1)/2 \approx 1.62$ — золотое сечение, а $\bar{d} = b + (a - b)/\tau$ — средний период последовательности Фибоначчи. Построена также аналитическая теория оптических спектров структур Фибоначчи в двухволновом приближении.

Результаты расчета спектров отражения приведены на рис. 4. Видно, что коэффициент отражения брэгговской структуры Фибоначчи (кривая 1) близок к коэффициенту отражения периодической брэгговской структуры (кривая 4) во всей области частот, за исключением структурированного провала вокруг частоты ω_0 . Изменение среднего периода \bar{d} , приводящее к отстройке от условия (6), или разупорядочение структуры приводят к резкому уменьшению коэффициента отражения. Таким образом, условие (6) действительно является резонансным брэгговским условием для последовательности Фибоначчи квантовых ям. Полуширина спектра на рис. 4 (кривая 1) порядка $N\Gamma_0$, где N — число ям в структуре, а Γ_0 — радиационное затухание экситона в квантовой яме, что является свидетельством сверхизлучательного режима в аперидической решет-

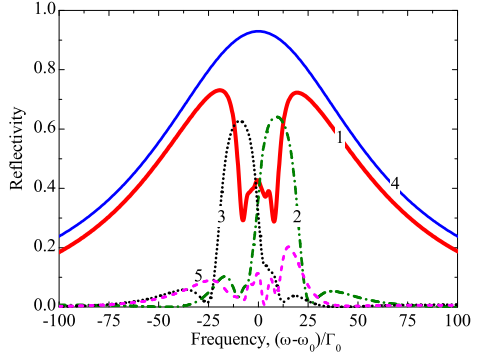


Рис. 4: Коэффициент отражения от структур с 54 квантовыми ямами. Спектры 1–3 соответствуют структурам Фибоначчи, в которых толщины слоев удовлетворяют (кривая 1) или отстроены (кривые 2,3) от брэгговского условия (6), спектр 4 — периодической структуре с квантовыми ямами, спектр 5 — разупорядоченной структуре.

ке. Эксперименты подтверждают ключевые предсказания теории для структур Фибоначчи на основе квантовых ям GaAs с AlGaAs барьерами [A6,A7].

Проведено также сопоставление спектров отражения последовательности Фибоначчи и других структур с квантовыми ямами: слабо разупорядоченной аперриодической решетки и последовательности Туэ-Морса. Показано, что спектры отражения произвольной аперриодической структуры с квантовыми ямами, которая допускает брэгговскую дифракцию и настроена на резонансное брэгговское условие, имеют форму, качественно совпадающую с формой спектров для структуры Фибоначчи (кривая 1 на рис. 4). При этом спектры с высокой точностью описываются аналитическим двухволновым приближением и слабо зависят от конкретного вида решетки во всей области частот, кроме узкого интервала вокруг резонансной частоты экситона ω_0 , шириной порядка Γ_0 . Исследованы также эффекты самоподобия в оптических спектрах структур Фибоначчи, проявляющиеся в узкой спектральной области $|\omega - \omega_0| \sim \Gamma_0$ при малых значениях нерадиационного затухания экситона $\Gamma \ll \Gamma_0$.

В параграфе 3.3 исследуется отражение света от двумерного квазикристалла, представляющего собой плоскость с квантовыми точками, расположенными в узлах мозаики Пенроуза. Описаны модель структуры и методы расчета. Представлен приближенный аналитический метод расчета оптических спектров в приближении двух звезд векторов дифракции, обобщающий двухволновое приближение, развитое для одномерных структур. Продемонстрировано, что типичные спектры зеркального отражения от мозаики Пенроуза квантовых точек имеют двухпиковый характер, в отличие от однопиковых спектров отражения от двумерной периодической решетки.

В Заключение обобщены основные результаты работы:

1. Построена теория зонной структуры одномерных, двумерных, и трехмерных фотонных кристаллов с учетом пространственной дисперсии диэлектрической проницаемости вблизи частоты экситонного резонанса. Рассчитаны спектры отражения и пропуска-

ния света. Показано, что положение нижних ветвей дисперсионной кривой экситонных поляритонов монотонно зависит от эффективной массы экситона и определяется главным образом взаимодействием света с экситоном на основном уровне размерного квантования как целого.

2. Предсказан новый оптический эффект в двумерных и трехмерных фотонных кристаллах — многократное увеличение коэффициента зеркального отражения света за счет двойной дифракции и полного внутреннего отражения от границы.
3. Проведено теоретическое исследование переключаемых фотонных кристаллов на основе композита опал-VO₂. С целью расчета положения фотонной стоп-зоны развито приближение эффективной среды для пор решетки опала, заполненной частицами диоксида ванадия. Определены параметры структуры, при которых сдвиг стоп-зоны при переходе VO₂ из полупроводниковой в металлическую фазу принимает наибольшее значение. Рассчитанная величина сдвига находится в согласии с экспериментом.
4. Построена теория отражения, пропускания и поглощения света двумерными сверхпроводящими фотонными кристаллами.
5. Построена теория экситонных поляритонов в квазипериодических структурах с квантовыми ямами. Сформулировано резонансное брэгговское условие дифракции света. Показано, что, в зависимости от числа ям, в структуре проявляются сверхизлучательный или фотонно-квазикристаллический режимы. Сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными позволило определить параметры квазидвумерных экситонов: резонансные частоты, излучательные и безызлучательные затухания.
6. Развито двухволновое приближение, позволяющее аналитически описывать оптические спектры квазипериодических структур в широкой области частот, за исключением узкого интервала вблизи

резонансной частоты экситона. Показано, что при малом нерадиационном затухании экситона в этом узком интервале проявляется скейлинг оптических спектров.

7. Построена теория взаимодействия света с массивом квантовых точек, расположенных в узлах квазикристаллической мозаики Пенроуза. Показано, что в спектрах отражения проявляются резонансные особенности, отсутствующие в периодической решетке.

Основные результаты диссертационной работы изложены в публикациях:

- [A1] Е. Л. Ивченко, А. Н. Поддубный. Резонансные трехмерные фотонные кристаллы.// ФТТ **48**(3), 540-547 (2006).
- [A2] А. Н. Поддубный. Дифракционный механизм зеркального отражения света от фотонных кристаллов.// ФТТ **49**(2), 346-351 (2007).
- [A3] М. М. Воронов, Е. Л. Ивченко, В. А. Кособукин, А. Н. Поддубный. Особенности спектров отражения и поглощения одномерных резонансных фотонных кристаллов.// ФТТ **49**(9), 1709-1718 (2007).
- [A4] A. N. Poddubny, E. L. Ivchenko, Yu. E. Lozovik. Low-frequency spectroscopy of superconducting photonic crystals.// Solid State Communications **146**, 143-147 (2008).
- [A5] A. N. Poddubny, L. Pilozzi, M. M. Voronov, E. L. Ivchenko. Resonant Fibonacci quantum well structures in one dimension.// Phys. Rev. B **77**, 113306 (2008).
- [A6] J. Hendrickson, B.C. Richards, J. Sweet, G. Khitrova, A.N. Poddubny, E. L. Ivchenko, M. Wegener, H. M. Gibbs. Excitonic polaritons in Fibonacci quasicrystals.// Opt. Express **16**, 15382-15387 (2008).
- [A7] M. Werchner, M. Schafer, M. Kira, S. W. Koch, J. Sweet, J. D. Olitzky, J. Hendrickson, B. C. Richards, G. Khitrova, H. M. Gibbs, A. N. Poddubny, E. L. Ivchenko, M. Voronov, M. Wegener. One

- dimensional resonant Fibonacci quasicrystals: noncanonical linear and canonical nonlinear effects.// *Opt. Express* **17**, 6813-6828 (2009).
- [A8] A. N. Poddubny, L. Pillozzi, M. M. Voronov, E. L. Ivchenko. Exciton-polaritonic quasicrystalline and aperiodic structures.// *Phys. Rev. B* **80**, 115314 (2009).
- [A9] A. N. Poddubny, E. L. Ivchenko. Photonic quasicrystalline and aperiodic structures.// *Physica E* **42**, 1871–1895 (2010).
- [A10] А. Б. Певцов, С. А. Грудинкин, А. Н. Поддубный, С. Ф. Каплан, Д. А. Курдюков, В. Г. Голубев. Переключение фотонной запрещенной зоны в трехмерных пленочных фотонных кристаллах на основе композитов опал-VO₂ в спектральной области 1.3-1.6 μm .// *ФТП* **44**(12), 1585–1590 (2010).
- [A11] A. N. Poddubny. Resonant Wood anomalies in photonic quasicrystals. // *Proc. Int. Symp. “Nanostructures Physics and Technology”* (St. Petersburg, Russia, 2010), pp. 308-309.

Список литературы

- [1] Photonic crystals. Molding the flow of light. / J. D. Joannopoulos, S. G. Johnson, J. N. Winn, R. D. Meade. — Princeton University Press, 2008.
- [2] Selective manipulation of stop-bands in multi-component photonic crystals: Opals as an example / M. V. Rybin, A. V. Baryshev, A. B. Khanikaev et al. // *Phys. Rev. B*. — 2008. — Vol. 77, no. 20. — P. 205106.
- [3] Спицын А. С., Глинский Г. Ф. Свойства волноводных мод в фотонном кристалле на основе щелевого кремния с дефектом // *ФТП*. — 2008. — Т. 42, № 10. — С. 1256–1262.
- [4] Resonant mode coupling of optical resonances in stacked nanostructures / N. A. Gippius, T. Weiss, S. G. Tikhodeev, H. Giessen // *Opt. Express*. — 2010. — Vol. 18, no. 7. — Pp. 7569–7574.

- [5] Complete photonic bandgaps in 12-fold symmetric quasicrystals / M. E. Zoorob, M. D. B. Charlton, G. J. Parker et al. // *Nature*. — 2000. — Vol. 404. — Pp. 740–743.
- [6] *Beggs D. M., Kaliteevski M. A., Abram R. A.* Properties of microcavities in two-dimensional photonic quasicrystals with octagonal rotational symmetry // *J. Modern Optics*. — 2007. — Vol. 54. — Pp. 881–893.
- [7] *Ивченко Е. Л., Несвижский А. И., Йорда С.* Брэгговское отражение света от структур с квантовыми ямами // *ФТТ*. — 1994. — Т. 36. — С. 1156–1161.
- [8] Giant exciton resonance reflectance in Bragg MQW structures / V. P. Kochereshko, G. R. Pozina, E. L. Ivchenko et al. // *Superlatt. Microstruct.* — 1994. — Vol. 15. — Pp. 471–471.
- [9] *Чалдышев В. В., Шолохов Д. Е., Васильев А. В.* Резонансная брэгговская структура (AlGaAs/GaAs/AlGaAs)₆₀ на основе второго уровня размерного квантования экситонов с тяжелыми дырками в квантовых ямах // *ФТП*. — 2010. — Т. 44, № 9. — С. 1260–1265.
- [10] Ultrafast stop band kinetics in a three-dimensional opal-VO₂ photonic crystal controlled by a photoinduced semiconductor-metal phase transition / A. B. Pevtsov, D. A. Kurdyukov, V. G. Golubev et al. // *Phys. Rev. B*. — 2007. — Vol. 75, no. 15. — P. 153101.