

Багаева Татьяна Юлиевна

**ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
РАДИАЦИОННЫХ ПОЛЯРИТОНОВ
В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СЛОЯХ
С СИЛЬНЫМ ЭКСИТОННЫМ РЕЗОНАНСОМ**

Специальность 01.04.05 – Оптика

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Саратов – 2008

Работа выполнена в Саратовском филиале Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор
Попов Вячеслав Валентинович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
Названов Василий Федорович

доктор физико-математических наук,
профессор
Гестрин Сергей Геннадиевич

Ведущая организация: Институт проблем точной механики и
управления РАН, г. Саратов

Защита состоится 24 декабря 2008 в 17 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д.212.243.01 в Саратовском государственном университете им. Н.Г. Чернышевского по адресу: 410026, Саратов, ул. Астраханская, 83, корп. 3, ауд. 34.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке им. В.А. Артисевич Саратовского государственного университета.

Автореферат разослан 22 декабря 2008.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,
профессор .

Аникин В.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

В последнее время внимание исследователей привлекает взаимодействие оптического излучения с низкоразмерными экситонными системами [1-23]. Экситон в полупроводниковом материале представляет собой связанное состояние электрона и дырки с кулоновской связью наподобие атома Бора. В результате взаимодействия световых волн с экситонными осцилляторами, приводящего к смешиванию исходных фотонных и экситонных состояний, образуются экситонные поляритоны.

Свойства радиационных поляритонов в двумерных (2D) экситонных системах изучались теоретически как в квантовомеханическом [1,7,8], так и в полуклассическом [3,5,6,9,14] подходах. В большинстве предыдущих теоретических работ [1,3,5-9] рассматривались материалы со сравнительно слабой экситон-фотонной связью (например, квантовые ямы на основе GaAs/AlGaAs). Для описания таких систем применялся подход, основанный на теории возмущений, использующий как уходящую, так и приходящую однородные плоские электромагнитные волны в плоскости 2D экситонной системы.

Практическая привлекательность поляритонных возбуждений в материалах с сильным экситонным резонансом определяется коротким радиационным временем жизни этих возбуждений и сильной нелинейностью поляритонного отклика, что делает перспективным применение поляритонных возбуждений в материалах с сильным экситонным резонансом для создания быстродействующих оптических переключающих и светоизлучающих устройств. В предыдущих работах были продемонстрированы времена поляритонного отклика порядка 10 пс в 2D экситонных системах на основе GaAs [4] и ультракороткие времена поляритонного отклика (порядка 1-0,1 пс) в тонких слоях материалов с сильным экситонным резонансом на основе CuCl [22] и самоорганизующихся многослойных органических-неорганических соединений на основе четырехйодистого свинца (PbI₄) [13].

Оптические свойства радиационных экситонных поляритонов в слоях с сильным экситонным резонансом изучались в ряде работ [11-23]. Однако ряд вопросов, касающихся взаимодействия поляритонов в таких слоях с наклонно падающим светом (или излучаемым) различной поляризации, изучен недостаточно.

Подход, основанный на теории возмущений, является достаточно обоснованным для описания систем с относительно слабой экситон-фотонной связью, но он непригоден для описания систем с сильной экситон-фотонной связью. К тому же, теоретический подход, основанный на теории возмущений, включающий как уходящие, так и приходящие волны, пригоден для изучения отражения или прохождения света в структурах с 2D экситонными системами, но оказывается несостоятельным для описания явления спонтанного излучательного распада экситонных поляритонов, наблюдаемого в экспериментах по фото-люминесценции экситонных поляритонов с временным разрешением [4,10,13], где имеются только уходящие волны. Наконец, теория возмущений дает нефизический результат бесконечного радиационного затухания поляритонных мод при приближении дисперсионной зависимости поляритонной моды к линии дисперсии света в окружающей 2D диэлектрической среде [8,9].

В данной работе для исследования оптических свойств поляритонов в 2D экситонных системах с сильной экситон-фотонной связью применяется самосогласованный электродинамический подход без использования какого-либо малого параметра, с представлением радиационного поля в окружающем экситонный слой диэлектрике в виде одиночной плоской неоднородной электромагнитной волны, которая удовлетворяет условию излучения, требующему, чтобы только уходящие волны существовали на бесконечном удалении от экситонной системы.

Целью диссертационной работы является решение ряда задач о взаимодействии радиационных поляритонов с наклонно падающим или излучаемым монохроматическим и импульсным светом в полупроводниковых слоях, обладающих сильным экситонным резонансом, в симметричном и асимметричном диэлектрическом окружении.

Научная новизна работы.

1. Впервые для исследования поляритонов в 2D экситонных системах с сильной экситон-фотонной связью применен самосогласованный электродинамический подход, представляющий радиационное световое поле в окружающей экситонный слой диэлектрической среде в виде плоской неоднородной электромагнитной волны, которая удовлетворяет условию излучения, требующему, чтобы только уходящие волны существовали на бесконечном удалении от экситонного слоя.

2. Вычислены дисперсия, скорость излучательного распада различных мод экситонных поляритонов, показатель неоднородности излучаемой световой волны, угловые диаграммы оптического излучения из поляритонных мод в симметричном и асимметричном диэлектрическом окружении экситонного слоя. Предсказана сильная дисперсия радиационных поляритонов в области световой линии, соответствующей окружающей экситонный слой диэлектрической среде. Показано, что дисперсионные ветви поляритонов выходят за пределы светового конуса и проникают в область медленных волн.
3. Построены угловые диаграммы светового излучения, возникающего при радиационном распаде экситон-поляритонных мод. Отмечена возможность наблюдения светового излучения медленных неоднородных поляритонных мод в экспериментах по фотолюминесценции экситонных поляритонов с временным разрешением.
4. Показано, что в процессе радиационного распада экситон-поляритонные моды излучаются из экситонного слоя в виде неоднородных электромагнитных волн, причем амплитуда излучаемых неоднородных световых волн возрастает в пространстве при удалении от экситонного слоя, тогда как их источник — экситонные осцилляторы в слое — затухают во времени.
5. Исследованы оптические спектры поляритонного поглощения света в экситонном слое в симметричном и асимметричном диэлектрическом окружении. В режиме полного внутреннего отражения света резонансы поглощения испытывают значительный сдвиг по частоте. Продемонстрирована возможность возбуждения резонансов высших поляритонных мод в высокоупорядоченных экситонных слоях.
6. С помощью формализма тензорных функций Грина проанализирован нестационарный процесс возбуждения экситон-поляритонных мод в 2D экситонном слое импульсом света.

Достоверность полученных в настоящей диссертации теоретических результатов определяется корректностью постановки задач, использованием точных вычислительных методов, а также непротиворечивостью полученных результатов по сравнению с известными результатами.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. В экситонном слое с сильным экситонным резонансом радиационные поляритонные моды испытывают распад с излучением неоднородных световых волн.
2. Величина выхода дисперсионных ветвей экситонных поляритонов за пределы светового конуса, соответствующего окружающей экситонный слой среде, определяется степенью неоднородности световой волны, излучаемой данной поляритонной модой. Излучение света поляритонными модами с дисперсией, находящейся за пределами светового конуса возникает вследствие уменьшения фазовой скорости неоднородных световых волн по сравнению со скоростью однородной световой волны.
3. Медленные поляритонные моды высвечиваются под скользящими углами к плоскости экситонного слоя при симметричном диэлектрическом окружении слоя и в диапазоне углов, соответствующих режиму полного внутреннего отражения света от границы раздела двух различных барьерных сред, при асимметричном диэлектрическом окружении экситонного слоя.
4. В режиме полного внутреннего отражения света при достаточно малом экситонном затухании можно наблюдать дублетные и триплетные поляритонные спектры, включающие как основные, так и высшие поляритонные моды.
5. Световые импульсы возбуждают континуум неоднородных экситон-поляритонных мод с различными волновыми векторами в плоскости экситонного слоя, испытывающих радиационный распад с излучением неоднородных световых волн.

Научная и практическая значимость работы.

Научная ценность работы заключается в получении новых сведений об оптических свойствах поляритонов в экситонных слоях с сильным экситонным резонансом.

Практическая значимость работы заключается в том, что полученные результаты могут найти применение для создания быстродействующих оптических переключающих и свето-излучающих устройств.

Апробация работы. Изложенные в диссертации результаты докладывались на следующих российских и международных конференциях: Saratov Fall Meeting 2003: Laser Physics and Photonics, Spectroscopy, and Molecular Modeling, SPIE (Саратов, 2003), 4th International Conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures (PLMCN-4) (С.-Петербург, 2004), 6th International Conference on Excitonic Processes in Condensed Matter (Cracow, Poland, 2004), 10th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (Dnepropetrovsk, Ukraine, 2004), IX Симпозиум “Нанопизика и нанозлектроника” (Нижний Новгород, 2005), Meeting of the American Physical Society (USA, 2007), IEEE-NANO-2007 Conference (Hong Kong, 2007), а также на научных семинарах СФ ИРЭ РАН и СГУ.

Публикации: По материалам диссертации опубликовано 13 печатных работ, из которых 6 статей в реферируемых журналах, 3 статьи в материалах международных конференций и 4 тезисов докладов на международных конференциях.

Личный вклад автора. Автору принадлежат аналитические и численные результаты второй и третьей глав диссертации. Результаты, изложенные в параграфе 2.1, получены совместно с Т.В. Теперик. Формализм тензорных функций Грина, используемый в четвертой главе диссертации, был развит автором диссертации совместно с N.J.M. Horing. Обсуждение полученных результатов и формулировка основных выводов диссертации были проведены автором диссертации совместно с научным руководителем.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и списка использованных источников. Полный объем диссертации составляет 111 стр. текста, в том числе 34 рисунка, библиографический список цитированных источников из 56 наименований, в том числе 13 публикаций автора по теме диссертационной работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы, научная новизна, изложено краткое содержание различных разделов диссертации и приведены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе**, которая носит обзорный характер, кратко изложены известные свойства радиационных поляритонов в 2D экситонных системах, а также кратко описан теоретический подход, основанный на теории возмущений, традиционно используемый для описания экситонных поляритонов с относительно слабой экситон-фотонной связью. Дана мотивировка применения альтернативного подхода для систем с сильной экситон-фотонной связью.

Вторая глава посвящена решению задачи о собственных поляритонных модах структуры, представляющей собой экситонный слой в окружении диэлектрических сред, с использованием самосогласованного электродинамического подхода, основанного на представлении радиационного поля в окружающем диэлектрике в виде уходящей плоской световой волны, которая удовлетворяет условию излучения, требующему, чтобы только уходящие волны существовали на бесконечном удалении от экситонного слоя. В параграфе 2.1 решается система уравнений Максвелла для двух полубесконечных диэлектрических сред, окружающих экситонный слой (барьерные среды), с эффективными граничными условиями в плоскости экситонного слоя, выведенными в приближении малости толщины экситонного слоя по сравнению с характерной длиной изменения светового поля по толщине экситонного слоя. В параграфе 2.2 решается система уравнений Максвелла для трех сред: экситонного слоя и двух полубесконечных диэлектрических сред в рамках полного электродинамического подхода, с учетом электродинамического запаздывания по толщине экситонного слоя. В обоих параграфах рассмотрены случаи симметричного и асимметричного диэлектрического окружения.

Традиционно различают три типа поляритонных мод экситонного слоя, различающихся поляризацией электрического поля. Вектор электрического поля Т-моды направлен перпендикулярно сагиттальной плоскости, содержащей волновой вектор поляритона и нормаль к поверхности экситонного слоя. Вектор электрического поля двух других поляритонных L- и Z-мод лежит в сагиттальной

плоскости. При этом L- и Z-моды отличаются распределением электрического поля в сагиттальной плоскости (при симметричном диэлектрическом окружении экситонного слоя L- и Z-моды имеют соответственно симметричное и антисимметричное распределение продольной к слою компоненты электрического поля поперек экситонного слоя).

Получены дисперсионные выражения для поляритонной Т-моды

$$\frac{k_z^{(1)} - k_z^{(3)}}{k_z^{(2)} + k_z^{(3)}} \exp(ik_z^{(3)}d) = \frac{k_z^{(1)} + k_z^{(3)}}{k_z^{(2)} - k_z^{(3)}} \exp(-ik_z^{(3)}d)$$

и для поляритонных L- и Z- мод

$$\frac{k_z^{(1)} \varepsilon(\tilde{\omega}) - k_z^{(3)} \varepsilon_1}{k_z^{(2)} \varepsilon(\tilde{\omega}) + k_z^{(3)} \varepsilon_2} \exp(ik_z^{(3)}d) = \frac{k_z^{(1)} \varepsilon(\tilde{\omega}) + k_z^{(3)} \varepsilon_1}{k_z^{(2)} \varepsilon(\tilde{\omega}) - k_z^{(3)} \varepsilon_2} \exp(-ik_z^{(3)}d),$$

где $k_z^{(1,2)}, k_z^{(3)}$ – перпендикулярные к плоскости слоя компоненты волнового вектора (которые, в общем случае, являются комплексными величинами) соответственно в окружающих экситонный слой средах и в экситонном слое, ε_1 , и ε_2 – диэлектрические проницаемости окружающих экситонный слой барьерных сред (постоянные величины), $\varepsilon(\tilde{\omega})$ – зависящая от частоты диэлектрическая проницаемость экситонного слоя, описываемая в виде локальной диэлектрической функции

$$\varepsilon(\tilde{\omega}) = \varepsilon_b \left(1 + \frac{\omega_{LT}}{\omega_0 - \tilde{\omega} - i\gamma_{ex}} \right),$$

где ε_b – фоновая диэлектрическая проницаемость, ω_0 – частота экситона, ω_{LT} – частота продольно-поперечного расщепления экситона, $\gamma_{ex} > 0$ – затухание экситона, вследствие всех процессов релаксации за исключением излучательного распада. Перпендикулярная и продольная по отношению к поверхности экситонного слоя компоненты $k_{||}$ волнового вектора в каждой из сред связаны соотношениями

$$k_z^{(j)} + k_{||}^2 = \left(\frac{\tilde{\omega}}{c} \right)^2 \varepsilon_j \quad (j=1,2),$$

$$k_z^{(3)} + k_{\parallel}^2 = \left(\frac{\tilde{\omega}}{c} \right)^2 \varepsilon(\tilde{\omega}),$$

где частота поляритона $\tilde{\omega}$ является в общем случае комплексной величиной, $\tilde{\omega} = \omega - i\gamma$; γ – суммарная скорость излучательного распада поляритонной моды, c – скорость света в вакууме. В пренебрежении затуханием экситона ($\gamma_{ex} = 0$) полная скорость распада экситонного поляритона определяется скоростью радиационного распада ($\gamma = \gamma_{rad}$). Продольная компонента волнового вектора k_{\parallel} полагается действительной величиной, что диктуется физической ситуацией, реализуемой в оптических экспериментах.

Рассмотрено поведение всех возможных решений дисперсионных уравнений. Найдены три ветви решений для каждой моды: поверхностная (характеризуемая стационарным поведением и спадом амплитуды поля поляритона при удалении от экситонного слоя), радиационная (характеризуемая затуханием поляритона во времени за счет радиационного распада и, вследствие этого, нарастанием амплитуды излучаемого светового поля при удалении от экситонного слоя) и нефизическая (характеризуемая стационарным поведением и нарастанием амплитуды поля при удалении от экситонного слоя) (см. рис. 1). Показано, что световое поле, излучаемое радиационной поляритонной модой в слое с сильным экситонным резонансом, представляет собой *неоднородную* плоскую электромагнитную волну (поле неоднородной волны непостоянно в плоскости фазового фронта волны [24]). В связи с этим в диссертации вводится термин “неоднородные радиационные поляритоны”.

Показано, что дисперсионные ветви радиационных поляритонных мод пересекают линию дисперсии света в окружающей экситонной среде (т.е. проникают в область медленных волн, характеризующихся фазовой скоростью, меньшей скорости света). Это свойство является общим для излучательных мод в открытых электродинамических системах [2,25,26]. В данной диссертации показано, что указанный факт объясняется *неоднородностью* излучаемой световой волны. Поскольку фазовая скорость неоднородной световой волны оказывается меньшей, чем фазовая скорость однородной световой волны, возникает возможность высвечивания из экситонного слоя поляритонных мод с дисперсией, находящейся за пределами светового конуса, соответствующего окружающей экситонной среде барьерной среде. Получено, что скорость радиационного распада неоднородных экситон-

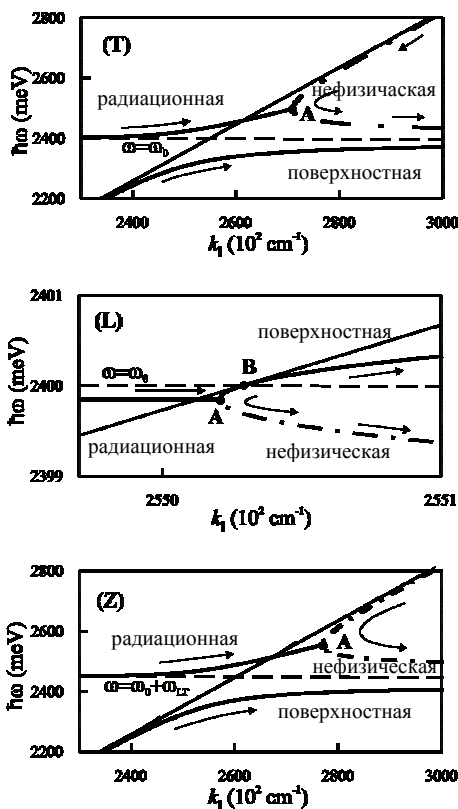


Рис. 1. Дисперсия экситонных поляритонов. Тонкая прямая линия соответствует дисперсии света в окружающей экситонный слой барьерной среде.

границы раздела двух различных барьерных сред, при асимметричном диэлектрическом окружении экситонного слоя. Отмечена возможность наблюдения указанного излучения в экспериментах по фотолюминесценции экситонных поляритонов с временным разрешением. Обнаружены высшие радиационные поляритонные моды, характеризующиеся значительно меньшими радиационным сдвигом частоты и скоростью радиационного распада. Проведенные расчеты для слоя материала $(C_6H_5C_2H_4NH_3)_2PbI_4$ (фенилэтилнитрат четырехйодистого свинца) с сильным экситонным резонансом ($\hbar\omega_{LT} = 50$ мэВ) показывают возможность получения сверхкоротких

поляритонных мод значительно возрастает до максимальной (конечной) величины при пересечении дисперсионной кривой поляритонной моды линии дисперсии света в окружающей экситонный слой среде и далее обращается в нуль в конечных точках радиационных ветвей за пределами светового конуса. Обнаружена сильная дисперсия радиационных экситон-поляритонных мод вблизи линий дисперсии света в барьерных средах.

Построены диаграммы светового излучения, возникающего при радиационном распаде радиационных поляритонных мод, показывающие, что световое излучение медленных неоднородных поляритонных мод возникает под скользящими углами излучения ($<10^\circ$) к плоскости экситонного слоя при симметричном диэлектрическом окружении слоя и в диапазоне углов излучения, соответствующих режиму полного внутреннего отражения света от

(порядка 10 фс) времен жизни радиационных поляритонов. Рассчитаны дисперсия и скорость радиационного распада радиационных поляритонов в экситонной системе с конечным диссипативным затуханием экситона ($\gamma_{ex} \neq 0$). Показано, что неоднородность излучаемой световой волны значительно увеличивается в результате ускорения суммарного распада поляритонных мод в диссипативных экситонных системах. Поэтому дисперсионные ветви радиационных поляритонов в экситонной системе с потерями проникают намного глубже в область медленных волн.

В третьей главе теоретически исследованы стационарные поляритонные спектры экситонного слоя. Рассмотрены случаи симметричного и асимметричного диэлектрического окружения слоя. В параграфе 3.1 рассчитаны оптические спектры поглощения тонкого экситонного слоя в приближении эффективных граничных условий. Показана динамика движения поляритонных резонансов при изменении угла падения света. При асимметричном диэлектрическом окружении экситонного слоя в режиме полного внутреннего отражения света от границы раздела двух различных барьерных сред резонансы поляритонного поглощения демонстрируют существенный сдвиг по частоте при изменении угла падения света, что согласуется с полученной во второй главе сильной дисперсией радиационных экситон-поляритонных мод вблизи световой линии.

В параграфе 3.2 исследованы поляритонные спектры экситонного слоя с использованием полного электродинамического подхода с учетом электродинамического запаздывания по толщине экситонного слоя. В этом случае в оптических спектрах экситонного слоя проявляются резонансы высших поляритонных мод. При асимметричном диэлектрическом окружении экситонного слоя в режиме полного внутреннего отражения света от границы раздела двух различных барьерных сред в случае *s*-поляризованного падающего света видны хорошо разрешимые дублетные поляритонные спектры, а в случае *p*-поляризованного падающего света – триплетные поляритонные спектры, включающие высшие поляритонные резонансы (см. рис.2). Рассчитаны спектры поглощения слоя $(C_6H_5C_2H_4NH_3)_2PbI_4$ с учетом неоднородного уширения экситонного резонанса ($\hbar\gamma_{ex} = 30$ мэВ). В этом случае высшие поляритонные резонансы не разрешаются, однако отчетливо виден сдвиг частоты резонансов в режиме полного внутреннего отражения света.

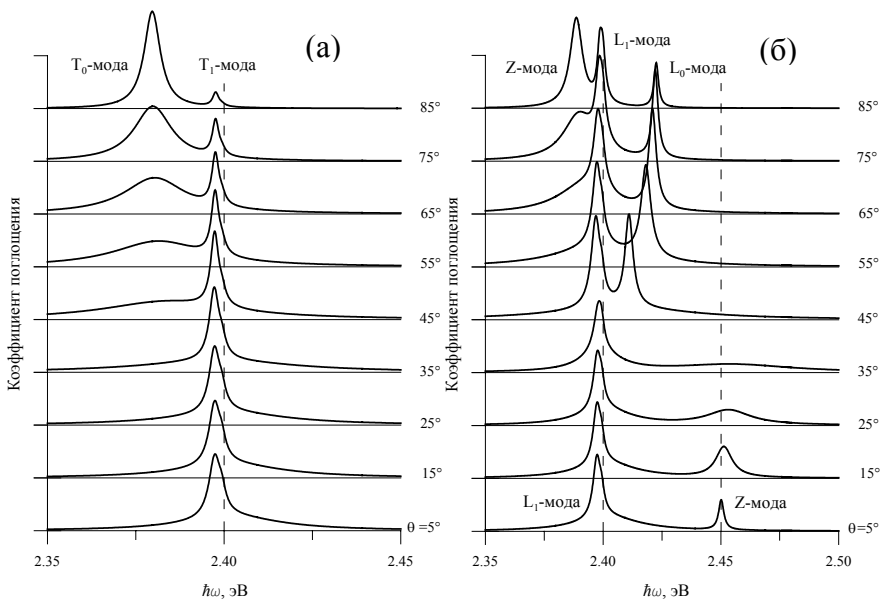


Рис.2. Спектры поляритонного поглощения в экситонном слое материала $(\text{C}_6\text{H}_5\text{C}_2\text{H}_4\text{NH}_3)_2\text{PbI}_4$ ($\gamma_{ex}=1$ мэВ) для различных углов падения s -поляризованного (а) и p -поляризованного (б) света.

В четвертой главе решается нестационарная задача о возбуждении и излучении поляритонных мод в 2D экситонном слое с использованием формализма тензорных функций Грина. В параграфе 4.1 с использованием тензорной функции Грина решается неоднородное волновое уравнение с эффективным внешним источником тока. Для этого строится тензорная функция Грина структуры с 2D экситонным слоем, помещенным в однородную диэлектрическую среду.

В параграфе 4.2, носящем методический характер, исследован отклик структуры на δ -импульс и прямоугольный импульс тока. Полное индуцированное электрическое поле содержит как вклад, соответствующий вынужденному отклику, существующему только во время действия импульса тока, так и вклад, соответствующий свободным экситонным модам, возбуждаемым в момент прохождения переднего (заднего) фронта импульса тока и высвечиваемым далее из 2D экситонного слоя со скоростью излучательного распада, вычисленной в главе 2.

В параграфе 4.3 с использованием полученной тензорной функции Грина строится решение для отклика 2D экситонного слоя на

падающий импульс света, задаваемый формой эффективного источника тока в уравнении Гельмгольца. Внешнее световое поле представляется в виде полубесконечного цуга плоской волны с частотой ω_0 падающей в плоскости x - z на 2D экситонный слой под углом θ_0 относительно нормали к плоскости слоя

$$\mathbf{E}_0(x, z, t) = E_0 \theta(-\tau) \exp(-i\omega_0 \tau),$$

где E_0 – амплитуда падающего импульса света, $\tau = t - (x \sin \theta_0 - z \cos \theta_0) \sqrt{\varepsilon_b} / c$, ε_b – диэлектрическая проницаемость среды, окружающей 2D экситонный слой, $\theta(\tau)$ – единичная ступенчатая функция. Рассмотрены случаи p - и s -поляризации падающего света. Для p -поляризованного света полное поле представляется в виде

$$\begin{aligned} \mathbf{E}^\pm(x, z, t) = & E_0 (\mathbf{e}_x \cos \theta_0 + \mathbf{e}_z \sin \theta_0) \theta(-\tau) \exp(-i\omega_0 \tau) - \\ & - E_0 \frac{i\sqrt{\varepsilon_b} \omega_{LT} d}{2c} \left\{ \theta(-\tau^\pm) (\mathbf{A}^\pm + \mathbf{B}^\pm) \exp(-i\omega_0 \tau^\pm) + \right. \\ & \left. + \theta(\tau^\pm) \left[\mathbf{A}^\pm \frac{\tilde{\omega}^{(L)}}{\omega_0} \exp(-i\tilde{\omega}^{(L)} \tau^\pm) + \mathbf{B}^\pm \frac{\tilde{\omega}^{(Z)}}{\omega_0} \exp(-i\tilde{\omega}^{(Z)} \tau^\pm) \right] \right\}, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} \tau^\pm = & t - (k_{x0}/\omega_0) x \mp (k_{z0}/\omega_0) z, \\ \mathbf{A}^\pm = & [\mathbf{e}_x \cos \theta_0 \mp \mathbf{e}_z \sin \theta_0] \frac{\tilde{\omega}^{(L)} \omega_0 \cos \theta_0}{(\omega_{ex} - i\gamma_{ex})(\omega_0 - \tilde{\omega}^{(L)})}, \\ \mathbf{B}^\pm = & [\mathbf{e}_z \sin \theta_0 \mp \mathbf{e}_x \cos \theta_0] \frac{\tilde{\omega}^{(Z)} \omega_0 \sin \theta_0 \operatorname{tg} \theta_0}{(\omega_{ex} + \omega_{LT} - i\gamma_{ex})(\omega_0 - \tilde{\omega}^{(Z)})}, \end{aligned}$$

$\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_z$ – единичные векторы выбранной системы координат, $\tilde{\omega}^{(L)}, \tilde{\omega}^{(Z)}$ – собственные частоты экситон-поляритонных L- и Z-мод. Верхние и нижние знаки относятся соответственно к верхнему ($z > 0$) и нижнему ($z < 0$) полупространствам.

Получено, что вклад в полное индуцированное электрическое поле вносят как вынужденные поля (второе слагаемое в вышеприведенном выражении для полного поля), так и поля, соответствующие свободным экситонным модам (третье слагаемое), существующим в системе после прохождения цуга внешней волны. Как вынужденные, так и свободные поля демонстрируют резонансы

на собственных частотах соответствующих экситон-поляритонных мод. Показано, что в результате импульсного светового воздействия возбуждается континуум свободных экситон-поляритонных мод с различными векторами в плоскости 2D экситонного слоя с дисперсионными и пространственно-временными характеристиками, соответствующими *неоднородным* экситонным поляритонам, изученным в главе 2. Поле излучения свободных поляритонных мод возрастает при удалении от экситонного слоя, спадая при этом во времени в каждой точке 2D экситонного слоя. В соответствии с принципом причинности поле излучения свободных поляритонных мод исчезает на расстоянии $|z|$ от 2D экситонного слоя, определяемом электродинамическим запаздыванием: $|z| > tc / \left(\sqrt{\varepsilon_b} \cos \theta_0 \right) - x \operatorname{tg} \theta_0$.

В Заключении сформулированы основные результаты работы.

В Приложении приведен вывод эффективных граничных условий, полученных в приближении малости толщины экситонного слоя по сравнению с характерной длиной изменения светового поля по толщине экситонного слоя.

Основные результаты работы

1. Решена задача о спектре радиационных поляритонов в экситонном слое с сильным экситонным резонансом. Для решения задачи использован самосогласованный электродинамический подход с представлением радиационного светового поля в окружающей экситонный слой диэлектрической среде в виде уходящей плоской неоднородной световой волны, удовлетворяющей условию излучения.
2. Рассчитаны дисперсионные зависимости и скорость излучательного распада различных мод экситонных поляритонов, показатель неоднородности излучаемой световой волны, угловые диаграммы светового излучения из поляритонных мод при симметричном и асимметричном диэлектрическом окружении экситонного слоя. Показано, что радиационные поляритоны испытывают сильную дисперсию в области линии дисперсии света в окружающей экситонный слой среде.

3. Показано, что излучаемые из экситонного слоя световые волны являются неоднородными электромагнитными волнами, причем их амплитуда возрастает в пространстве при удалении от экситонного слоя и спадает во времени в каждой точке экситонного слоя. Дисперсионные ветви радиационных поляритонов выходят за пределы светового конуса, соответствующего окружающей экситонный слой среде, и проникают в область медленных волн вследствие неоднородности излучаемой световой волны.
4. Исследованы стационарные спектры поляритонного поглощения света в экситонном слое при симметричном и асимметричном диэлектрическом окружении экситонного слоя. В режиме полного внутреннего отражения света резонансы поглощения, соответствующие частотам экситонных поляритонов, испытывают значительный сдвиг по частоте. Показана возможность возбуждения высших поляритонных мод в высокоупорядоченных экситонных слоях.
5. С помощью формализма тензорных функций Грина проанализирован процесс возбуждения радиационных экситон-поляритонных мод в 2D экситонном слое импульсом падающего света. Показано, что в результате импульсного светового воздействия возбуждается континуум экситон-поляритонных мод с дисперсионными и пространственно-временными характеристиками, соответствующими неоднородным радиационным поляритонам.

Цитированная литература

1. Агранович В.М., Дубовский О.А. Влияние запаздывающего взаимодействия на спектр экситонов в одномерных и двумерных кристаллах // Письма в ЖЭТФ. 1966. Т.3. С.345.
2. Orrit M., Aslangul C., Kottis P. Quantum-mechanical-model calculations of radiative properties of a molecular crystal. I. Polaritons and abnormal decays of excitons in one- and two-dimensional systems // Phys. Rev. B. 1982. V.25. P.7263.
3. Ивченко Е.Л. Экситонные поляритоны в периодических структурах с квантовыми ямами // ФТТ. 1991. Т.33. С.2388.

4. Deveaud B., Clérot F., Roy N., Satzke K., Sermage B., Katzer D.S. Enhanced radiative recombination of free excitons in GaAs quantum wells // *Phys. Rev. Lett.* 1991. V.67. P.2355.
5. Tassone F., Bassani F., Andreani L.C. Quantum-well reflectivity and exciton-polariton dispersion // *Phys. Rev. B.* 1992. V.45. P.6023.
6. Ивченко Е.Л., Кавокин А.В. Отражение света от структур с квантовыми ямами, квантовыми проводами и квантовыми точками // *ФТТ.* 1992. Т.34. С.1815.
7. Citrin D.S. Radiative lifetimes of excitons in quantum wells: Localization and phase-coherence effects // *Phys. Rev. B.* 1993. V.47. P.3832.
8. Jorda S., Rössler U., Broido D. Fine structure of excitons and polariton dispersion in quantum wells // *Phys. Rev. B.* 1993. V.48. P.1669.
9. Atanasov R., Bassani F., Agranovich V.M. Mean-field polariton theory for asymmetric quantum wells // *Phys. Rev. B.* 1994. V.49. P.2658.
10. Vinattieri A., Shah J., Damen T.C., Kim D.S., Pfeiffer L.N., Maialle M.Z., Sham L.J. Exciton dynamics in GaAs quantum wells under resonant excitation // *Phys. Rev. B.* 1994. V.50. P.10868.
11. Fujita T., Sato Y., Kuitani T., Ishihara T. Tunable polariton absorption of distributed feedback microcavities at room temperature // *Phys. Rev. B.* 1998. V.57. P.12428.
12. Fujita T., Ishihara T. Directionally enhanced photoluminescence from distributed feedback cavity polaritons // *J. Phys. Soc. Jpn.* 1999. V.68. P.2918.
13. Fujita T., Nakashima H., Hirasawa M., Ishihara T. Ultrafast photoluminescence from $(\text{C}_6\text{H}_5\text{C}_2\text{H}_4\text{NH}_3)_2\text{PbI}_4$ // *J. Lumin.* 2000. V.87-89 P.847.
14. Yablonskii A.L., Muljarov E.A., Gippius N.A., Tikhodeev S.G., Fujita T., Ishihara T. Polariton effect in distributed feedback microcavities // *J. Phys. Soc. Jpn.* 2001. V.70. P.1137.
15. Shimizu M., Ishihara T. Subpicosecond transmission change in semiconductor-embedded photonic crystal slab: Toward ultrafast optical switching // *Appl. Phys. Lett.* 2002. V.80. P.2836.
16. Shimada R., Yablonskii A.L., Tikhodeev S.G., Ishihara T. Transmission properties of a two-dimensional photonic crystal slab with an excitonic resonance // *IEEE J. Quantum Electron.* 2002. V.38. P.872.

17. Yablonskii A.L., Muljarov E.A., Gippius N.A., Tikhodeev S.G., Ishihara T. Optical properties of polaritonic crystal slab // *phys. stat. sol. (a)*. 2002. V.190. P.413
18. Muljarov E.A., Ishihara T., Tikhodeev S.G. Ultrafast spontaneous emission: Exciton radiative decay vs phonon scattering and disorder // *phys. stat. sol. (c)*. 2003. V.0. N5. P.1421.
19. Shimizu M., Gippius N.A., Tikhodeev S.G., Ishihara T. Coulomb correction to the dressed exciton in an inorganic-organic layered semiconductor: Detuning dependence of the Stark shift // *Phys. Rev. B*. 2004. V.69. P.155201.
20. Fujisawa J., Ishihara T. Excitons and biexcitons bound to a positive ion in a bismuth-doped inorganic-organic layered lead iodide semiconductor // *Phys. Rev. B*. 2004. V.70. P.205330.
21. Shimizu M., Fujisawa J., Ishi-Hayase J. Influence of dielectric confinement on excitonic nonlinearity in inorganic-organic layered semiconductors // *Phys. Rev. B*. 2005. V.71. P.205306.
22. Ichimiya M., Ashida I., Yasuda H., Ishihara H., Itoh T. Ultrafast degenerate four-wave mixing in CuCl ultrathin films // *phys. stat. sol. (b)*. 2006. V.243. P.3800.
23. Shimizu M., Fujisawa J., Ishihara T. Nonlinear luminescence from an inorganic-organic layered semiconductor // *J. Lumin.* 2007. V.122-123. P.485.
24. Борн, М. Основы оптики / М. Борн, М., Е. Вольф. – М.: Наука, 1973. С.38.
25. Lampariello P., Frezza F., Oliner A.A. The transition region between bound-wave and leaky-wave ranges for a partially dielectric-loaded open guiding structure // *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.* 1990. V.38. P.1831.
26. Tikhodeev S.G., Yablonskii A.L., Muljarov E.A., Gippius N.A., Ishihara T. Quasiguided modes and optical properties of photonic crystal slabs // *Phys. Rev. B*. 2002. V.66. P.045102.

Список опубликованных работ по теме диссертации

Статьи в реферируемых журналах

1. Popov V.V., Teperik T.V., Horing N.J.M., Bagaeva T.Yu. Inhomogeneous radiative decay of polariton modes in a two-dimensional excitonic system // *Solid State Communications*. 2003. V.127. P.589-594.

2. Popov V.V., Bagaeva T.Yu., Teperik T.V., Horing N.J.M., Ayaz Y. Light absorption by polaritons in an interface layer with strong excitonic response: effects of retardation and total reflection // *physica status solidi (c)*. 2005. V.2. No.2. P.896–899.
3. Popov V.V., Bagaeva T.Yu., Teperik T.V., Ultrafast radiative decay of polaritons in an interface layer with strong excitonic response // *Journal of Luminescence*. 2005. V.112. P.225–229.
4. Horing N.J.M., Bagaeva T.Yu., Popov V.V. Dyadic Green's function analysis of the non-stationary nanoelectrodynamic polaritonic response of a two-dimensional excitonic layer // *Journal of Physics: Conference Series*. 2006. V.35. P.297–306.
5. Багаева Т.Ю., Попов В.В., Horing N.J.M. Временная динамика радиационных поляритонных мод в двумерном экситонном слое // *Письма в журнал технической физики*. 2007. Т.33. №4. С.79-86.
6. Horing N.J.M., Bagaeva T.Yu., Popov V.V. Excitation of radiative polaritons in a 2D excitonic layer by a light pulse // *Journal of the Optical Society of America B*. 2007. V.24. No.9. P. 2428-2435.

Статьи в сборниках конференций

7. Bagaeva T.Yu., Popov V.V., Teperik T.V., Tikhodeev S.G. Optical properties of polaritons in two-dimensional excitonic systems // *Proceedings of SPIE*. 2004. V.5476: Saratov Fall Meeting 2003: Laser Physics and Photonics, Spectroscopy and Molecular Modeling IV, edited by V.L. Derbov, L.A. Melnikov, L.N. Babkov (SPIE, Bellingham, WA, 2004). P.15-29.
8. Popov V.V., Bagaeva T.Yu., Horing N.J.M. Green function study of the non-stationary polaritonic response of a two-dimensional excitonic layer // In: *Conference Proceedings of the 10th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory*, Dnepropetrovsk, Ukraine, September 14-17, 2004, P.315-317.
9. Horing N.J.M., Bagaeva T.Yu., Popov V.V., Liu S.Y., Sawamura M. Inhomogeneous 2D polariton radiation excited by a finite electromagnetic wave train // *The 7th International Conference on Nanotechnology (IEEE-NANO-2007)*. Hong Kong, China. 2-5 August. 2007. Sec. Modelling and Simulation. No.110. P.536-540.

Тезисы докладов на конференциях

10. Багаева Т.Ю., Попов В.В., Horing N.J.M., Пахомова Т.В. Возбуждение неоднородных радиационных поляритонов в двумерных экситонных системах импульсом света // IX

Симпозиум “Нанозифика и нанозлектроника”, 25-29 марта 2005 г., Нижний Новгород, т.2, С.306-307.

11. Popov V.V., Bagaeva T.Yu., Teperik T.V. Effect of the strong coupling between light and excitons in slabs of the PbI_4 -based perovskite-type semiconductors // In: 4th International Conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures (PLMCN-4), June 29 – July 3, 2004, St. Petersburg, Russia: Program and Abstracts, P.129.
12. Popov V.V., Bagaeva T.Yu., Teperik T.V. Polaritonic effects in a slab of material with strong exciton-photon coupling // In: 6th International Conference on Excitonic Processes in Condensed Matter, Cracow, 6-9 July 2004: Book of Abstracts, P.P73.
13. Horing N.J.M., Bagaeva T.Yu., Popov V.V., Mancini J. Light pulse excitation of radiative polaritons in a 2D excitonic layer // Meeting of the American Physical Society. MAR07. Abstracts. ID: BAPS.2007.MAR.C1.69 March 2007.