

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Надькин Леонид Юрьевич

**Исследование оптических свойств полупроводника
в экситонной области спектра
под действием мощного импульса накачки
и слабого зондирующего импульса**

01.04.21 – лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2013

Работа выполнена на кафедре нелинейной оптики и квантовой радиофизики физико-математического факультета Государственного образовательного учреждения «Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко»

Научный руководитель: д.ф.-м.н., профессор Хаджи Петр Иванович
Государственное образовательное учреждение «Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко»

Официальные оппоненты: д.ф.-м.н., профессор,
Сазонов Сергей Владимирович
Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский Институт»

д.ф.-м.н., доцент
Елютин Сергей Олегович
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ульяновский государственный университет» (УлГУ)

Защита состоится 12 декабря 2013 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д.501.001.31 в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, расположенном по адресу: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д.1, стр. 62, корпус нелинейной оптики, аудитория имени С.А. Ахманова.

С диссертацией можно ознакомиться в Отделе диссертаций Научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д.27).

Автореферат разослан «___» _____ 2013 г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь диссертационного совета
к.ф.-м.н.

Коновко Андрей Андреевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В настоящее время существенно повысился интерес к исследованию эффектов когерентного нелинейного распространения лазерного излучения в полупроводниках. К ним можно отнести эффекты самофокусировки, самоиндуцированной прозрачности, оптической нутации, оптического эха, бистабильности и мультистабильности, которые связаны с более общим эффектом — так называемым оптическим Штарк-эффектом. Еще одним из проявлений оптического Штарк-эффекта является эффект самоотражения лазерного излучения, который был предсказан и изучен для среды, состоящей из двухуровневых атомов. Физически он заключается в том, что в полубесконечной оптически однородной нелинейной среде возникает обратная волна на индуцированном поле прямой волны пространственно неоднородном распределении нелинейного показателя преломления среды. Так как полупроводники обладают широким разнообразием механизмов и большими значениями оптических нелинейностей и малыми временами релаксации, то следует ожидать более яркого проявления эффекта самоотражения в собственных полупроводниках в системе экситонов и биэкситонов. Хорошо известно, например, что процессы двухфотонного возбуждения биэкситонов из основного состояния кристалла и оптической экситон-биэкситонной конверсии характеризуются гигантскими силами осциллятора и узкими, δ -образными полосами излучения. Детально был изучен эффект самоотражения в полупроводниках при различных механизмах нелинейности. Однако в этих работах не рассматривался эффект самоотражения при учете нескольких механизмов нелинейности. Кроме того, пропускание и отражение лазерного излучения нелинейной пластинкой (резонатором Фабри-Перо) также существенно модифицируются при учете эффекта самоотражения по сравнению с учетом только френелевского отражения. Поэтому особенности протекания эффекта самоотражения в плоскопараллельной пластинке по сравнению с полубесконечной средой также представляют несомненный интерес.

Исследование нелинейно-оптических явлений в полупроводниках вызывает повышенный интерес, как с точки зрения фундаментальной науки, так и с точки зрения огромных перспектив практиче-

ского использования результатов исследований при создании новых приборов квантовой электроники. Развитие лазерной техники и возможность генерации коротких и ультракоротких импульсов излучения позволили обнаружить и исследовать новые явления, в том числе и вышеописанный эффект самоотражения. Особую значимость в связи с этими и другими исследованиями при экспериментальном и теоретическом изучении оптических спектров полупроводников в экситонной области спектра при больших уровнях возбуждения кристалла приобрел метод Мощный-пробный (pump-probe). Он основан на использовании двух пучков лазерного излучения: мощного пучка накачки (pump) и слабого, зондирующего пучка (probe). Слабый пучок зондирует изменения оптических свойств кристалла, обусловленные действием поля накачки. Эти изменения определяются амплитудой и частотой поля накачки и параметрами самого кристалла. Метод pump-probe использовался и при экспериментальном исследовании оптического Штарк-эффекта в полупроводниках, и при исследовании многих других эффектов. Появление лазеров, генерирующих пикосекундные и фемтосекундные импульсы, привело к необходимости пересмотреть протекание метода pump-probe в нестационарном режиме.

Целью представленной диссертационной работы является построение теории метода pump-probe в нестационарном режиме и исследование особенностей его проявления при возбуждении экситонов и биэкситонов с учетом экситон-фотонного и упругого экситон-экситонного взаимодействий, оптической экситон-биэкситонной конверсии и двухфотонного возбуждения биэкситонов из основного состояния кристалла, исследование эффекта самоотражения в полубесконечной среде при двухимпульсном взаимодействии света с экситонами и биэкситонами, а также эффект самоотражения в плоскопараллельной пластинке при двухфотонном возбуждении биэкситонов из основного состояния кристалла.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается в построении теории нестационарного метода pump-probe в полупроводниках при учете различных механизмов нелинейного взаимодействия света с экситонами и биэкситонами, а также в рассмотрении эффекта самоотражения для

плоскопараллельной пластинки, являющейся более удобным объектом при создании различных элементов оптических систем обработки информации.

Практическая значимость работы определяется возможностью применения полученных результатов при разработке новых интегрально-оптических приборов, таких, как РОС-лазеры, голографические элементы памяти в динамическом режиме действия когерентного лазерного излучения на полупроводник, оптических фильтров, бистабильных и мультистабильных переключающих элементов и др. Разработанный нестационарный метод pump-probe расширяет возможности методов диагностики полупроводников.

На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:

1. Теория pump-probe метода и самоотражения для системы экситонов и биэкситонов большой плотности в полупроводниках при учете различных механизмов нелинейности.

2. Возникновение лоренцевской полосы поглощения слабого света в полупроводниках в присутствии мощной двухфотонной накачки биэкситонного состояния, расположенной на частоте, равной разности частот биэкситонного уровня и фотона мощного импульса в области, где отсутствует реальный уровень.

3. Особенности поведения эффекта Аутлера–Таунса при одновременном учете экситон-фотонного взаимодействия, оптической экситон-биэкситонной конверсии и двухфотонного возбуждения биэкситонов.

4. Резонансный по полю накачки эффект установления долговременной осцилляционной эволюции абсорбционной восприимчивости.

5. Установление мультистабильного отражения света в полубесконечной среде в условиях двухимпульсного возбуждения экситонов и биэкситонов.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались на 2nd International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics

(Кишинев, 2004), IV международной конференции «Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы» (Ульяновск, 2004), International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO/LAT 2005) (St. Petersburg, 2005), IV Международной научно-практической конференции «Математическое моделирование в образовании, науке и производстве» (Тирасполь, 2005), 3rd International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics (Кишинев, 2006), International conference “Physics of low-dimensional structures” in honour of the 80-th anniversary of Professor Evghenii Petrovich Pokatilov (Кишинев, 2007), International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO/LAT 2007) (Минск, 2007), Международной конференции «Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы» (Ульяновск, 2007), 4th International Conference on materials science and condensed matter physics (Кишинев, 2008), 3rd International conference on physics of electronic materials (Phyem'08) (Калуга, 2008), IV Украинская научная конференция по физике полупроводников (Одесса, 2007), Conferinta fizicienilor din Moldova CFM (Кишинев, 2009), V Украинская научная конференция по физике полупроводников (Ужгород, 2011), International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO/LAT 2013) (Москва, 2013).

Достоверность результатов теоретических исследований, представленных в диссертации, подтверждается корректностью разработанных математических моделей, их адекватностью по известным критериям оценки изучаемых процессов, использованием известных положений фундаментальных наук, сходимостью полученных теоретических результатов с данными эксперимента.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 29 работ, в том числе 16 статей и 13 тезисов докладов на научных конференциях, перечисленных в конце автореферата.

Личный вклад автора

Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причём вклад диссертанта был определяю-

шим. Все представленные в диссертации теоретические результаты получены лично автором.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, трех оригинальных глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации 138 страниц, из них 122 страницы текста, включая 43 рисунка. Библиография включает 116 наименований на 13 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обсуждается актуальность темы, сформулирована цель работы и кратко изложено основное содержание диссертации.

Первая глава состоит из двух параграфов.

В первом параграфе исследован метод pump-probe при двухфотонном двухимпульсном взаимодействии с биэкситонами в стационарном и нестационарном режиме. Из первых принципов получено выражение для абсорбционной компоненты восприимчивости на частоте пробного импульса в зависимости от расстройки резонанса и амплитуды мощного импульса в стационарном режиме. Получен закон дисперсии для фотонов слабого импульса. Показано, что при взаимодействии фотонов мощного импульса с биэкситонами на частоте, равной разности частот биэкситонного состояния и мощной накачки, может возникнуть виртуальное квазиэнергетическое состояние, с которым взаимодействуют фотоны слабого импульса. В нестационарном режиме найдены аналитические решения для восприимчивости среды на частоте пробного импульса в случае, когда импульс накачки имеет ступенчатый вид. Оказалось, что в этом случае абсорбционная компонента восприимчивости имеет лоренцеподобный вид с максимумом поглощения на частоте, равной разности частот биэкситонного состояния и мощной накачки. При отличных от нуля расстройках резонанса наблюдается сильный колебательный режим, затухающий со временем. В определенные моменты времени абсорбционная компонента восприимчивости отрицательна, что свидетельствует об усилении пробного импульса. Выключение накачки приводит к экспоненциальному убыванию числа биэкситонов и, как следствие, к уменьшению до нуля поглощения на частоте пробного импульса. Рассмотр-

рен случай падения на среду мощной накачки гауссовского вида. Показано, что в данном случае также наблюдается лоренцеподобное поглощение, но отсутствует колебательный режим.

Во втором параграфе описан метод $\mu\text{mp-rprobe}$ в стационарном и нестационарном режимах при следующем механизме нелинейности: мощный импульс действует в области М-полосы, а пробный импульс — в области экситонного перехода. Кроме того, учитывается двухфотонное взаимодействие полей обоих импульсов с биэкситонами. В данном случае в отсутствии накачки наблюдается лоренцевское поведение полосы поглощения и поляритоноподобный закон дисперсии в отсутствии накачки мощного импульса. Это поведение обусловлено линейным экситон-фотонным взаимодействием. Включение накачки приводит к расщеплению экситонного и биэкситонного состояний. Наблюдается ярко выраженный эффект Ауслера–Таунса. Положение новых пиков поглощения определяется расстройкой резонанса и амплитудой поля мощной накачки. Учет двухфотонного взаимодействия приводит к ослаблению поглощения при отрицательных расстройках резонанса и увеличению при положительных расстройках резонанса без изменения положения квазиуровней. В нестационарном режиме при включении и выключении накачки наблюдается сильный колебательный режим.

Во второй главе рассмотрен метод $\mu\text{mp-rprobe}$ для экситонной области спектра в нестационарном режиме при учете упругого экситон-экситонного взаимодействия в условиях действия мощного и слабого импульсов. Из первых принципов получены дифференциальные уравнения, позволяющие найти восприимчивость среды на частоте пробного импульса в зависимости от расстроек резонанса и амплитуды мощного импульса в нестационарном режиме. В стационарном режиме, изученном ранее, наблюдалось скачкообразное изменение плотности концентрации экситонов в зависимости от расстройки резонанса и величины поля мощной накачки. Было показано, что в стационарном режиме наблюдаются штарковские сдвиги экситонного перехода (красное и фиолетовое смещение), обусловленные рекомбинацией и генерацией когерентных экситонов. При изменении уровня накачки смещение линий поглощения и усиления происходит во взаимно противоположных направлениях, а при сканировании частоты накачки — в одинаковых. Показано, что при определенных условиях

эти сдвиги носят скачкообразный характер, обусловленный таким же поведением плотности экситонов.

В нестационарном режиме поведение системы описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений. Были рассмотрены различные формы импульса накачки. В случае падения на среду ступенчатого импульса наблюдается ярко выраженный колебательный режим в поведении плотности экситонов и абсорбционной компоненты восприимчивости. При малых временах амплитуда колебаний увеличивается с ростом поля накачки. Получены резонансные значения поля накачки и расстройек резонанса, при которых в поведении абсорбционной компоненты восприимчивости колебательный режим сохраняется на больших временах. Это обусловлено возможностью появления параметрического резонанса, причем роль изменяющегося параметра играет концентрация экситонов, зависящая от поля накачки и расстройки резонанса. Выключение импульса накачки приводит к экспоненциальному убыванию плотности экситонов. Что касается абсорбционной компоненты восприимчивости, то выключение накачки приводит к возникновению колебательного режима при ненулевых значениях расстройки резонанса зондирующего импульса. При падении гауссовского импульса на среду колебательный режим в поведении концентрации экситонов и абсорбционной компоненты восприимчивости особенно сильно проявляется на переднем фронте падающего импульса. Резонансные значения поля накачки и расстройек резонанса наблюдаются и в этом случае, что выражается в увеличении амплитуды колебаний абсорбционной компоненты восприимчивости среды.

Третья глава состоит из двух параграфов.

В первом параграфе исследован эффект самоотражения лазерного излучения от плоской поверхности полупроводника, в котором фотоны одного и того же импульса возбуждают экситоны из основного состояния кристалла, а фотоны второго импульса превращают их в биэкситоны благодаря процессу оптической экситон-биэкситонной конверсии. Из первых принципов получены выражения для нелинейной диэлектрической функции в зависимости от расстройки резонанса и амплитуд полей распространяющегося излучения. Численными методами решена система нелинейных волновых уравнений для комплексных амплитуд полей. Получены энергетические коэффициенты отражения в

зависимости от интенсивностей падающих импульсов и значений параметров. Оказалось, что коэффициенты отражения характеризуются сложным многозначным поведением в зависимости от амплитуд полей падающих импульсов. Предсказана возможность полного просветления среды для поля, действующего в области М-полосы. В системе возможно возникновение узких участков с резким градиентом нелинейного показателя преломления и соответствующих ему пиков распределенного коэффициента отражения, которые представляют собой индуцированные полями накачки резонаторы Фабри–Перо, отражение внутри которых приводит к мультистабильности коэффициентов отражения на торце кристалла.

Во втором параграфе третьей главы рассматривается эффект самоотражения в плоскопараллельной пластинке при одноимпульсном двухфотонном взаимодействии с биекситонами. Оказалось, что энергетические коэффициенты отражения и пропускания в зависимости от интенсивности падающего излучения и размеров пластинки испытывают сложное многозначное поведение при отрицательных значениях расстройки резонанса. Проведен сравнительный анализ энергетических коэффициентов пропускания без учета самоотражения, описываемых, как известно, функцией Эйри, и энергетических коэффициентов пропускания с учетом самоотражения. Оказалось, что самоотражение увеличивает размер петель бистабильности и мультистабильности, возникающих в результате многократного френелевского отражения от торцов пластинки.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе и сделаны выводы о возможности использования метода pump-probe как одного из перспективных методов диагностики оптических свойств полупроводников. Также сделан вывод о возможности экспериментального наблюдения эффекта самоотражения и о перспективности использования данного эффекта при создании различных элементов оптических систем обработки информации.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Построена теория нестационарного метода pump-probe при следующих механизмах нелинейности: при двухфотонном двухимпульсном взаимодействии с биекситонами, в условиях действия

накачки в области М-полосы и действия пробного импульса в области экситонного перехода, а также в условиях действия обоих импульсов в экситонной области спектра при учете упругого экситон-экситонного взаимодействия.

2. Предсказано существование лоренцевской полосы однофотонного поглощения света слабого импульса биекситонами в условиях их двухфотонного возбуждения из основного состояния кристалла фотонами мощного импульса. Пик полосы поглощения располагается на частоте, равной разности частот биекситонного состояния и фотона мощного импульса, т. е. в области, где отсутствует реальный уровень. Показано, что закон дисперсии для фотонов слабого импульса имеет поляритоноподобный характер, причем продольно-поперечное расщепление растет пропорционально интенсивности мощного импульса.

3. Изучен эффект Аутлера–Таунса под действием мощного импульса, смешивающего экситонное и биекситонное состояния, и слабого импульса, действующего в экситонной области спектра, при одновременном учете процесса двухфотонного возбуждения биекситонов из основного состояния кристалла фотонами обоих импульсов. Показано, что эффект Аутлера–Таунса обусловлен только процессом оптической экситон-биекситонной конверсии, тогда как двухфотонное поглощение света и квантовая интерференция света приводят к керовской нелинейности слагаемых в восприимчивости. Предсказано несимметричное влияние квантовой интерференции на положение и динамику ветвей закона дисперсии.

4. Представлена нестационарная версия *pump-probe* метода в экситонной области спектра при учете экситон-фотонного и упругого экситон-экситонного взаимодействий. Показано, что плотность экситонов и компоненты восприимчивости, осциллируя, затухают во времени. Предсказывается резонансный по амплитуде поля накачки эффект резкого уменьшения затухания в системе когерентных экситонов в узких областях изменения амплитуды поля и расстройки резонанса.

5. Изучено явление самоотражения от полубесконечной среды для двух падающих импульсов, один из которых находится в резонансе с экситонным переходом, а другой — в резонансе с переходом в области экситон-биекситонной конверсии. Показано, что коэффициенты отражения характеризуются сложным многозначным поведением в за-

висимости от амплитуд полей импульсов. Это обусловлено тем, что в среде формируются индуцированные распространяющимися полями микрорезонаторы Фабри–Перо, внутри которых многократное переотражение света приводит к мультистабильному отражению торца кристалла. Предсказывается возможность просветления среды для поля в области М-полосы. Доказано, что явление самоотражения в пластинке способствует увеличению размеров петель мультистабильности по сравнению с френелевским отражением. Показано, что без учета эффекта самоотражения многозначное поведение оптических функций у пластинок размерами больше микрометра не наблюдается. Учет эффекта самоотражения позволяет создавать различные элементы оптических систем обработки информации более оптимальных размеров.

ПУБЛИКАЦИИ

1. Хаджи П.И., Ляхомская К.Д., Надькин Л.Ю. Отражение света от торца полубесконечного полупроводника в условиях двухфотонного возбуждения биэкситонов // Оптика и спектроскопия. 2002. Т. 92. № 2. С. 301.

2. Хаджи П.И., Надькин Л.Ю. Эффект самоотражения в полупроводниках в двухимпульсном режиме // Квантовая электроника. 2004. Т 34. № 12. С. 1173.

3. Хаджи П.И., Надькин Л.Ю. О методе диагностики полупроводников при двухфотонном возбуждении биэкситонов // Квантовая электроника. 2006. Т 36. № 5. С. 1.

4. Хаджи П.И., Надькин Л.Ю. Оптические свойства полупроводников в экситонной области спектра в условиях действия мощного импульса накачки в области М-полосы // ФТТ. 2005. Т. 47. № 12. С. 2146.

5. Хаджи П.И., Надькин Л.Ю. Явление самоотражения плоскопараллельной пластинки полупроводника при двухфотонном возбуждении биэкситонов // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. № 1. С. 67.

6. Khadzhi P.I., Nad'kin L.Yu., Tkachenko D.V. Optical properties of semiconductor in exciton range of spectrum in presence of strong pump pulse in M-band of luminescence // Mold. J. Phys. Sci. 2006. V.4. P. 399.

7. Khadzhi P.I., Nad'kin L.Y., Tkachenko D.V. Autler-Townes splitting of excitons and biexcitons in semiconductors // Proceedings of SPIE, ICONO 2006. V. 6259. P. 625909.

8. Khadzhi P.I., Nadkin L.Yu., Optical properties of semiconductor in exciton range of spectrum in non-stationary regime taking into account the exciton-exciton interaction // Proceedings of SPIE, ICONO 2010. 2011. V. 7993. P. 79930T.

9. Khadzhi P.I., Nad'kin L.Yu. Autler-townes effect in exciton range of spectrum due to a strong pump pulse in M-band of luminescence // 2rd International conference on physics of electronic materials (Phyem'05), Калуѓа, 2005. V. 2. С. 281.

10. Khadzhi P.I., Nad'kin L.Yu., Tkachenko D.V. Autler-Townes effect in the excitons and biexcitons in semiconductors // Proceedings of the 4th International Conference on "Microelectronics and Computer Science", Chisinau, 2005. V.I. P. 91.

11. Khadzhi P.I., Nad'kin L.Yu., Tkachenko D.V. Investigation of Autler-Townes splitting of excitons and biexcitons in semiconductors // Abstracts of CFM-2005 Chisinau, 2005 P. 80.

12. Надькин Л.Ю., Васильева О.Ф., Хаджи П.И. Нестационарный pump-probe метод исследования оптических свойств полупроводников в экситонной области спектра // Proceedings of the 2nd International Conference "Telecommunications, Electronics and Informatics", Chisinau, 2008. V. II. P. 334.

13. Хаджи П.И., Надькин Л.Ю. Pump-probe-метод исследования свойств полупроводников в условиях двухфотонного возбуждения би-экситонов // Вестник приднестровского университета. 2005. № 3. С. 17.

14. Хаджи П.И., Надькин Л.Ю., Флорина О.Ф. Метод pump-probe исследования оптических свойств полупроводников в экситонной области спектра при учете двухфотонного взаимодействия с биэкситонами // Вестник приднестровского университета. 2006. № 3. С. 40.

15. Надькин Л.Ю. Хаджи П.И. Особенности протекания явления стационарного самоотражения в полупроводниках в системе когерентных экситонов и биэкситонов // Вестник приднестровского университета. 2007. № 3. С. 41.

16. Хаджи П.И., Надькин Л.Ю. Pump-probe метод исследования оптических свойств полупроводников в экситонной области спектра при учете упругого экситон-экситонного взаимодействия // Вестник приднестровского университета. 2009. № 3. С. 60.

17. Khadzhi P.I., Lyakhomskaya K.D., Nad'kin L. Yu. Two-beam self-reflection phenomenon in semiconductors // IQEC 2002, Technical Digest of International Quantum Electronics Conference. Moscow. Russia. P. 327.

18. Хаджи П.И., Надькин Л.Ю. Явление двухимпульсного самоотражения в полупроводниках // Физика электронных материалов. Материалы международной конференции, Калуга. Россия. С. 274.

19. Khadzhi P.I., Nad'kin L. Yu. Pump-probe approach for dielectric susceptibilities of high density exciton-biexciton system // Abstracts of 2th International Conference on materials science and condensed matter physics, Chisinau, 2004. P. 113.

20. Nad'kin L.Yu., Lyakhomskaya K.D., Khadzhi P.I. Reflectivity of front end a semi-infinite semiconductor under conditions of two-photon excitation of biexcitons // Abstracts of CFM-2007, Chisinau, 2007. P. 44.

21. Khadzhi P.I., Nad'kin L.Yu., D.V. Tkachenko Autler-Townes splitting for the absorption bands in semiconductors in the system of coherent excitons and biexcitons. // Abstracts of 3rd International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics Chisinau, 2006. P. 214.

22. Хаджи П.И., Надькин Л.Ю. Исследование оптических свойств полупроводников методом pump-probe // Труды международной конференции «Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы». Ульяновск, 2006. С. 164.

23. Khadzhi P.I., Vasiliev V.V., Florina O.F., Nad'kin L.Yu.. Phase control in the phenomenon of single-pulse two-photon nutation of coherent biexcitons in semiconductors // Тезисы докладов III Украинской научной конференции физики полупроводников (УНКФП III), Одесса, 2007. Т. 1. С. 211.

24. Надькин Л.Ю., Ляхомская К.Д., Хаджи П.И. Явления стационарного самоотражения в полупроводниках в системе когерентных экситонов и биэкситонов // Тези доповідей III Міжнародної науково-практичної конференції "МЕТІТ-3", Кременчук, 2008. С. 196.

25. Хаджи П.И., Надькин Л.Ю. Pump-probe метод исследования оптических свойств полупроводника в экситонной области спектра в нестационарном режиме при учете упругого экситон-экситонного взаимодействия // Тезисы докладов V Украинской научной конференции физики полупроводников (УНКФП V), Ужгород, 2011. С. 208.

26. Хаджи П.И., Надькин Л.Ю. Явление двухимпульсного самоотражения в полупроводниках // Материалы III Международной научно-

практической конференции «Математическое моделирование в образовании, науке и производстве», Тирасполь, 2003. С. 92.

27. Надькин Л.Ю. Pump-probe метод исследования свойств полупроводников в условиях двухфотонного возбуждения биэкситонов // Материалы IV Международной научно-практической конференции «Математическое моделирование в образовании, науке и производстве», Тирасполь, 2005. С. 65.

28. Надькин Л.Ю., Флорина О.Ф. Метод Pump-probe исследования оптических свойств экситонов и биэкситонов в полупроводниках (стационарный и нестационарный режимы) // Материалы V Международной научно-практической конференции «Математическое моделирование в образовании, науке и производстве», Тирасполь, 2007. С. 96.

29. Хаджи П.И., Коровай А.В., Коровай О.В., Ляхомская К.Д., Марков Д.А., Надькин Л.Ю. Разработка модели сверхбыстрого элемента памяти для быстродействующих (в пико- и фемтосекундной области) ЭВМ на базе тонкой полупроводниковой пленки в экситонной области спектра // Сборник инновационно-инвестиционных проектов Приднестровского государственного университета им. Т.Г. Шевченко. 2009. С. 7.