

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

На правах рукописи

Марков Дмитрий Александрович

**ДИНАМИКА НЕЛИНЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ
И УСИЛЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ
В СИСТЕМЕ КОГЕРЕНТНЫХ ЭКСИТОНОВ И БИЭКСИТОНОВ
В ПОЛУПРОВОДНИКАХ**

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,*
Манькин Эдуард Анатольевич
Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Национальный исследовательский центр «Курчатовский
Институт»

д.ф.-м.н. Гиппиус Николай Алексеевич
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской
академии наук»

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

Защита состоится «___» декабря 2013 г. в 16:30 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. Будущее интегральной оптики и микроэлектроники связывают с технологиями, направленными на увеличение степени интеграции узлов устройств обработки информации, что позволит повысить скорость и надежность их работы. При этом элементами микросхем могут являться тонкие пленки полупроводников, а носителем информации – свет. Тонкими считаются пленки, толщина L которых удовлетворяет неравенству $a_0 \ll L \ll \lambda$, где a_0 – боровский радиус экситона, λ – длина волны падающего излучения. Возникающие при прохождении электромагнитного излучения через тонкий слой резонансной среды нелинейные эффекты, такие же как и в объемном полупроводнике (самоиндуцированная прозрачность, оптическая бистабильность и мультистабильность и др.), позволяют использовать такие элементы для создания различного рода миниатюрных устройств (усилителей, переключателей, транзисторов и др.), которые могут послужить элементной базой для узлов оптического компьютера, волоконно-оптических линий связи и т.д. Проявление указанных эффектов зависит от динамики экситонов и биэкситонов, являющихся элементарными возбуждениями в полупроводниках, которая, в итоге, определяет характер пропускания (отражения) лазерного излучения тонкой пленкой. Поэтому представляется актуальным изучение оптических эффектов, связанных с динамикой экситонов и биэкситонов в полупроводниках под действием импульсов лазерного излучения. Результаты таких исследований могут быть востребованы в таких отраслях, как разработка оптических систем и методов обработки, хранения и передачи информации, создание устройств для оптического компьютера и волоконно-оптических линий связи и т.п.

Кроме изучения особенностей прохождения света через размерно-ограниченную резонансную среду, важным является вопрос измерения различных параметров среды, таких как матричный элемент квантовых переходов, константа затухания и др.. Возможность таких измерений предоставляет явление оптической нутации, выражающееся в периодическом изменении плотностей частиц (фотонов, экситонов, биэкситонов) на временах, гораздо меньших времен релаксации квазичастиц. Поэтому исследование

особенностей проявления эффекта оптической нутации в среде также является актуальной задачей.

Целью представленной диссертационной работы является теоретическое исследование эффектов когерентного нелинейного взаимодействия ультракоротких импульсов лазерного излучения с тонкой пленкой полупроводника в условиях одноимпульсного возбуждения экситонов большой плотности и двухимпульсного двухфотонного возбуждения биэкситонов из основного состояния кристалла, оптической нутации в системе фотонов, экситонов и биэкситонов и механизмов усиления излучения на частоте оптической экситон-биэкситонной конверсии и терагерцового излучения на частоте оптического двухэкситон-биэкситонного перехода.

Научная новизна

1. Впервые построена последовательная теория взаимодействия фазомодулированных ультракоротких импульсов лазерного излучения с тонкой пленкой полупроводника в экситонной области спектра с учетом упругого экситон-экситонного взаимодействия. Предсказан оптический аналог Фешбах-резонанса.
2. Установлены особенности пропускания двух ультракоротких импульсов лазерного излучения тонкой пленкой полупроводника в условиях двухфотонного двухимпульсного возбуждения биэкситонов из основного состояния кристалла.
3. Впервые построена теория эффекта оптической нутации в системе фотонов, экситонов и биэкситонов с учетом различных механизмов взаимодействия света с веществом.
4. Впервые предложен механизм усиления света на частоте оптической экситон-биэкситонной конверсии за счет инверсии населенностей биэкситонного уровня относительно экситонного.
5. Впервые предложен механизм и построена теория усиления терагерцового излучения, используя оптический двухэкситон-биэкситонный переход.

Практическая значимость работы определяется возможностью применения полученных результатов для построения таких узлов и элементов интегрально-оптических устройств, как преобразователи формы импульсов лазерного излучения,

переключающие элементы на основе явления бистабильности, ячейки памяти и др.. Результаты исследования также могут быть использованы для получения информации об оптических параметрах экситонов и биэкситонов в полупроводниках.

Положения, выносимые на защиту:

1. Теория взаимодействия тонкой пленки полупроводника с ультракороткими импульсами когерентного лазерного излучения при однофотонном возбуждении экситонов большой плотности.
2. Оптический аналог Фешбах-резонанса для экситонов в тонкой пленке.
3. Теория пропускания света тонкой пленкой полупроводника в условиях двухимпульсного двухфотонного возбуждения биэкситонов из основного состояния кристалла.
4. Оптическая нутация в системе когерентных экситонов, биэкситонов и фотонов при учете различных механизмов нелинейности.
5. Теория усиления света в области М-полосы люминесценции благодаря оптической экситон-биэкситонной конверсии при двухфотонной накачке биэкситонного состояния и терагерцового излучения благодаря оптической двухэкситон-биэкситонной конверсии при накачке в экситонный уровень.

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), 22nd General Conference of the Condensed Matter Division of the European Physical Society (Rome, 2008), IV Украинская научная конференция по физике полупроводников (Одесса, 2009), Conferinta fizicienilor din Moldova CFM (Кишинев, 2009), International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO/LAT 2010) (Казань, 2010), International Conference "Telecommunications, Electronics and Informatics" (ICTEI-2010) (Кишинев, 2010), V Украинская научная конференция по физике полупроводников (Ужгород, 2011), International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO/LAT 2013) (Москва, 2013).

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 47 работ, в том числе 17 статей и 30 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 определяющим. Все представленные в диссертации теоретические результаты получены лично автором.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, обзора литературы, 4 оригинальных глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации 137 страниц, из них 117 страниц текста, включая 43 рисунка. Библиография включает 164 наименования на 17 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой оригинальной главе рассматриваются нелинейно-оптические свойства тонкой пленки полупроводника (ТПП) в условиях возбуждения экситонов большой плотности ультракоротким импульсом (УКИ) резонансного лазерного излучения. Рассмотрены стационарный и нестационарный режимы пропускания. Показано, что в стационарном режиме плотность экситонов в зависимости от уровня возбуждения может быть как нелинейной, но однозначной функцией, так и многозначной, причиной чего является смещение экситонного уровня при увеличении интенсивности возбуждения. В нестационарном режиме рассмотрены особенности пропускания импульсов различной формы и интенсивности. Показано, что динамика плотности экситонов, и обусловленной ею амплитуды проходящего поля, представляет собой осцилляционный режим. Период и амплитуда колебаний определяется интенсивностью и расстройкой резонанса падающего излучения. Принципиально новые эффекты получены при рассмотрении случая прохождения через ТПП импульса с чирпингом. В этом случае амплитуда экситонной волны поляризации и амплитуда проходящего через пленку излучения также являются фазово-модулированными. Считая чирпинг самосогласованным, в том смысле, что скорость изменения фазы определяется амплитудой экситонной волны поляризации среды, получено уравнение для нормированной плотности экситонов, содержащее перенормированную константу упругого экситон–экситонного взаимодействия. Эта константа зависит от параметра чирпинга, изменяя значение которого можно существенно влиять на динамику системы. При определенных значениях параметра чирпинга среда перестает вести себя как нелинейная, несмотря на высокий уровень возбуждения. Рассмотренные случаи приводят к выводу, что наличие фазовой модуляции у падающего импульса позволяет изменить не только величину межчастичного взаимодействия в среде, но и ее знак. Это можно интерпретировать как оптический аналог Фешбах-резонанса.

Во второй оригинальной главе рассматривается прохождение через ТПП двух УКИ лазерного излучения в условиях двухфотонного двухимпульсного возбуждения биэкситонов из основного состояния кристалла. Рассмотрены нестационарные режимы пропускания импульсов прямоугольной и гауссовской форм различной длительности и интенсивности и их комбинации для случая точного

резонанса и при наличии расстройки резонанса. Показано, что в случае точного резонанса плотность биэкситонов характеризуется наличием стационарного значения, при достижении которого наблюдается полное отражение более слабого импульса. Если же суммарная частота обоих импульсов отличается от собственной частоты биэкситонного перехода, наблюдается лишь частичное отражение более слабого импульса тем большее, чем меньше расстройка резонанса. Также изучено влияние параметра, значение которого обусловлено толщиной пленки, на динамику плотности биэкситонов в среде и амплитуду проходящих импульсов. При малых значениях данного параметра поведение системы меняется незначительно, однако его увеличение в некоторых случаях приводит к появлению особенностей в динамике плотности биэкситонов и амплитуд проходящих полей. Также показано, что при выключении одного из падающих импульсов рекомбинационное (вторичное) излучение возникает на частотах обоих импульсов благодаря процессу индуцированного распада предварительно созданных в пленке биэкситонов. Возможны случаи, когда после прохождения излучения в пленке сохраняется остаточная плотность биэкситонов. Меняя форму, амплитуду и время прохождения одного из падающих импульсов, можно делить импульс с меньшей амплитудой на два субимпульса различной длительности. Предсказан эффект гистерезисного пропускания пленки в зависимости от интенсивности падающих импульсов.

В третьей оригинальной главе изучается явление оптической нутации в системе когерентных экситонов, фотонов и биэкситонов в полупроводнике типа CuCl , в условиях, когда на кристалл падают два УКИ резонансного лазерного излучения. При этом предполагается, что фотоны первого импульса попарно возбуждают биэкситоны, а частота второго соответствует частоте перехода в области М-полосы поглощения. Они перемешивают экситонное и биэкситонное состояния, обуславливая возникновение оптического Штарк-эффекта, смещение и расщепление энергетических уровней экситонов и биэкситонов с ростом уровня возбуждения кристалла. Предполагается, что длительности обоих импульсов на много меньше времени релаксации биэкситонов и их спектральные ширины меньше энергии связи биэкситона. В этих условиях стационарное состояние не успевает установиться за время действия импульсов и может иметь

место оптическая нутация в системе когерентных экситонов, биэкситонов и фотонов. Динамика такой системы в зависимости от начальных значений может представлять собой как периодические, так и аperiodические изменения плотностей частиц.

В четвертой оригинальной главе рассмотрен процесс усиления слабого импульса на частоте оптической экситон-биэкситонной конверсии, а также предложен новый механизм генерации терагерцового излучения. Усиление на частоте оптической экситон-биэкситонной конверсии возможно, когда на биэкситонном уровне благодаря мощному импульсу создается инверсия населенностей относительно экситонного, тогда падение даже слабого импульса на частоте М-полосы приводит к индуцированному сбросу инверсии и, как следствие, к усилению слабого импульса. Генерация терагерцового излучения может быть получена при возбуждении экситонов из основного состояния кристалла, что приведет к инверсии населенностей двухэкситонного состояния относительно биэкситонного. Индуцированный переход на более энергетически выгодное биэкситонное состояние будет сопровождаться генерацией фотонов с частотой, соответствующей энергии связи биэкситона.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Временная эволюция плотности экситонов в тонкой пленке полупроводника при учете экситон-фотонного и упругого экситон-экситонного взаимодействия представляет собой затухающие к стационарному состоянию осцилляции, частота и амплитуда которых определяется уровнем возбуждения и расстройкой резонанса. Проходящее через пленку излучение определяется как суперпозиция падающего излучения и вторичного излучения, генерируемого экситонной поляризацией.
2. Предсказана возможность существования оптического аналога Фешбах-резонанса, состоящего в перенормировке константы упругого экситон-экситонного взаимодействия благодаря взаимодействию экситонов с полем ультракороткого импульса с самосогласованным чирпингом. Мгновенная частота самосогласованно модулированного по фазе импульса в каждый

момент времени компенсирует сдвиг экситонного уровня, обусловленный ростом плотности экситонов. Введенный параметр чирпинга определяет режимы усиления, ослабления или полного исчезновения нелинейного эффекта, обусловленного упругим экситон-экситонным взаимодействием.

3. В условиях двухимпульсного двухфотонного возбуждения биэкситонов из основного состояния кристалла в тонкой пленке полупроводника возможно установление режима полного просветления пленки для более сильного импульса и полного непропускания (отражения) для более слабого. Характерное время реакции пленки определяется ее толщиной. Предсказывается скачкообразное изменение пропускания при выключении одного из импульсов. Доказана возможность бистабильного пропускания пленкой импульсов, причем пропусканием одного из импульсов можно управлять изменением амплитуды другого импульса.
4. Динамика явления оптической нутации в системе когерентных экситонов и биэкситонов на временах, на много меньших времени релаксаций возбуждений среды, под действием фотонов двух ультракоротких импульсов, представляет собой периодические либо аperiodические колебания плотностей частиц, частота и амплитуда которых существенно определяется начальными условиями.
5. Предсказан механизм усиления излучения в области М-полосы люминесценции при двухфотонной накачке биэкситонного состояния и механизм усиления терагерцового излучения при накачке в экситонный уровень благодаря оптической двухэкситон-биэкситонной конверсии.

ПУБЛИКАЦИИ

1. *Хаджи П.И., Коровай А.В., Марков Д.А.* Нелинейное пропускание ультракоротких импульсов лазерного излучения тонкой плёнкой полупроводника в условиях двухфотонного двухимпульсного возбуждения биэкситонов // *Оптика и спектроскопия*. 2008. Т.104, С. 109.
2. *Хаджи П.И., Розанов Н.Н., Марков Д.А. и др.* Пропускание фазово-модулированного лазерного излучения тонкой пленкой полупроводника в экситонной области спектра и оптический эффект Фешбаха // *Оптика и спектроскопия*. 2009. Т. 107. С. 613.

3. *Beloussov I.V., Khadzhi P.I., Corovai A.V., Markov D.A.* Nonlinear transmission and reflection of ultrashort laser pulses by a thin semiconductor film under two-photon generation of biexcitons // *J. Phys.: Condens. Matter.* 2011. V. 23. P. 225802.
4. *Марков Д.А., Белоусов И.В., Хаджи П.И., Коровай А.В.,* О генерации (усилении) терагерцового излучения в процессе резонансного возбуждения экситонов в полупроводниках // *Письма в ЖТФ.* 2012. Т. 38. С. 15.
5. *Хаджи П.И., Коровай А.В., Марков Д.А.* Тонкая пленка полупроводника как базовый элемент прибора, генерирующего ультракороткие импульсы лазерного излучения // *Датчики и системы* 2004. Т. 67. С. 47.
6. *Khadzhi P.I., Corovai A.V., Markov D.A. et al.* Peculiarities of supershot light pulses transmission by thin semiconductor film in exciton range of spectrum // *Nanoscale Phenomena: Fundamentals and Applications* by Horst Hahn, Anatoli Sidorenco, Ion Tiginyanu, Chapter 4, Berlin, Heidelberg: Springer – Verlag, 2009. P. 29.
7. *Khadzhi P.I., Corovai A.V., Markov D.A., Lichman V.A.* Peculiarities of two-pulse transmission (reflection) of laser radiation by thin semiconductor films // *Proceedings of SPIE, ICONO 2005.* 2006. V.6259. P. 62590M.1-9.
8. *Khadzhi P.I., Corovai A.V., Korovai O.V., Markov D.A.* Interaction of supershort light pulses with thin semiconductor films in exciton range of spectrum // *Proceedings of SPIE, ICONO 2007.* V. 6729 P. 67291W.
9. *Beloussov I.V., Khadzhi P.I., Corovai A.V., Markov D.A.* Nonlinear transmission of ultrashort laser pulses by a thin semiconductor film under two-photon generation of biexcitons // *Proceedings of SPIE, ICONO 2010.* V. 7993. P. 79930F.
10. *Khadzhi P.I., Rosanov N.N., Markov D.A. et al.* Transmission of phase modulated laser light through a thin semiconductor film in the excitonic spectral range and an optical analog of the Feshbach effect // *Proceedings of SPIE, ICONO 2010.* V. 7993. P. 79930G.
11. *Khadzhi P.I., Rosanov N.N., Markov D.A. et al.* Amplification and lasing at M-band of luminescence // *Proceedings of SPIE, ICONO 2010.* V. 7994. P. 799404.
12. *Khadzhi P.I., Corovai A.V., Markov D.A.* Resonatorless optical bistability in transmission of thin semiconductor film // *Moldavian J. Phys. Sci.* 2005. V.4. P. 408.
13. *Khadzhi P.I., Corovai A.V., Beloussov I.V., Markov D.A.* Transmission of supershort light pulses by thin semiconductor films in exciton range of spectrum // *Mold. J. Phys. Sci.* 2008. V.7. P. 8.
14. *Коровай А.В., Хаджи П.И., Марков Д.А.* Явление оптической бистабильности в пропускании тонкой полупроводниковой пленки в

- условиях двухфотонного возбуждения биэкситонов // Вестник приднестровского университета 2004, № 1. С. 57.
15. *Хаджи П.И., Коровай А.В., Марков Д.А.* Особенности пропускания (отражения) ультракоротких импульсов лазерного излучения тонкой пленкой полупроводника в условиях возбуждения экситонов и биэкситонов // Вестник приднестровского университета 2004, № 1. С. 94.
 16. *Марков Д.А.* Оптическая нутация в системе когерентных экситонов и биэкситонов // Вестник приднестровского университета 2007, №3. С. 53
 17. *Хаджи П.И., Коровай А.В., Коровай О.В., Марков Д.А.* Взаимодействие тонкой полупроводниковой пленки с фазово-модулированным УКИ лазерного излучения в экситонной области спектра при высоком уровне возбуждения и оптический аналог Фешбах-резонанса // Вестник приднестровского университета. 2009. №3. С. 53
 18. *Khadzhi P.I., Corovai A.V., Korovai O.V., Markov D.A.* Interaction of supershort light pulses with thin semiconductor films in exciton range of spectrum // Technical Digest ICONO/LAT 2007, Minsk, 2007. P. I08-21.
 19. *Khadzhi P.I., Rosanov N.N., Markov D.A. et al.* Gain and lasing at M-band of luminescence of semiconductors // Technical program International Conference "Laser Optics 2008", Санкт-Петербург, 2008. С. 59.
 20. *Khadzhi P.I., Corovai A.V., Markov D.A.* Amplification and lasing at M-band of luminescence // Technical digest of ICONO/LAT 2010, Kazan, 2010. P. LME5.
 21. *Khadzhi P.I., Rosanov N.N., Markov D.A. et al.* Phase-modulated laser light transmission by a thin semiconductor film in the exciton range of spectrum and optical analog of the Feshbach resonance // Technical digest of ICONO/LAT 2010, Kazan, 2010. P. ITuQ15.
 22. *Belousov I.V., Khadzhi P.I., Corovai A.V., Markov D.A.* Nonlinear transmission of ultrashort laser pulses by a thin semiconductor film under two-photon generation of biexcitons // Technical digest of ICONO/LAT 2010, Kazan, 2010. P. IThL1.
 23. *Markov D.A., Corovai A.V., Korovai O.V., Khadzhi P.I.* Generation and amplification of THz radiation in the system of excitons and biexcitons // Technical digest of ICONO/LAT 2013, Moscow, 2013. P. JSA5.
 24. *Khadzhi P.I., Corovai A.V., Belousov I.V., Markov D.A.* Transmission of supershort light pulses by thin semiconductor films in exciton range of spectrum // 22nd General Conference of the Condensed Matter Division of the European Physical Society, Rome, 2008. P. 43.
 25. *Khadzhi P.I., Corovai A.V., Markov D.A.* Optical bistability in transmission of thin semiconductor film without external feedback // Proceedings of the 4th International Conference on "Microelectronics and Computer Science", Chisinau, 2005. V.I. P. 87

26. *Khadzhi P.I., Corovai A.V., Korovai O.V., Markov D.A.* The peculiarities of interaction of supershort light pulses with thin semiconductor films in exciton range of spectrum // Труды IX международной конференции «Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы», Ульяновск, 2007. С. 202.
27. *Белоусов И.В., Хаджи П.И., Коровай А.В., Марков Д.А.* Нелинейное пропускание двух последовательных ультракоротких импульсов лазерного излучения тонкой пленкой полупроводника в условиях двухфотонного возбуждения биэкситонов // Труды международной конференции "Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы". Ульяновск, 2011. С. 305.
28. *Хаджи П.И., Коровай А.В., Марков Д.А.* Усиление и лазерная генерация на М-полосе люминесценции // Proceedings of the 2nd International Conference "Telecommunications, Electronics and Informatics", Chisinau, 2008. V. II. P. 317.
29. *Хаджи П.И., Коровай А.В., Коровай О.В., Марков Д.А.* Оптическая нутация в системе когерентных экситонов и биэкситонов // Proceedings of the 3rd International Conference "Telecommunications, Electronics and Informatics", Chisinau, 2010. V.I. C.176.
30. *Белоусов И.В., Хаджи П.И., Коровай А.В., Марков Д.А.* Нелинейное пропускание ультракоротких импульсов лазерного излучения тонкой полупроводника в условиях двухфотонного возбуждения биэкситонов // Proceedings of the 3rd International Conference "Telecommunications, Electronics and Informatics", Chisinau, 2010. V.I. C.336.
31. *Khadzhi P.I., Corovai A.V., Markov D.A., Lichman V.A.* Transmission and reflection of two-pulse laser radiation by thin semiconductor films // Abstracts of 3rd International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics Chisinau, 2006. P. 217.
32. *Марков Д.А.* Оптическая нутация в системе когерентных экситонов и биэкситонов // Abstracts of International Conference of Young Researchers, Chisinau, 2007. С. 118.
33. *Khadzhi P.I., Corovai A.V., Markov D.A.* Optical bistability in transmission of thin semiconductor film without external feedback // Abstracts of 2nd International conference on physics of electronic materials (Phyem'05), Калуга, 2005. С. 232.
34. *Khadzhi P.I., Corovai A.V., Korovai O.V., Markov D.A.* Interaction of thin semiconductor films in exciton range of spectrum with supershort light pulses // The book of abstracts of International conference "Physics of low-dimensional structures" in honour of the 80-th anniversary of Professor Evghenii Petrovich Pokatilov Chisinau, 2007. P. 15.
35. *Khadzhi P.I., Corovai A.V., Belousov I.V., Markov D.A.* Nonlinear transmission and reflection of supershort light pulses by thin semiconductor

- films in exciton range of spectrum // Abstracts of CFM-2007, Chisinau, 2007. P. 38.
36. *Khadzhi P.I., Rosanov N.N., Markov D.A. et al.* Gain and lasing at M-band of luminescence of semiconductors // Abstracts of 4th International Conference on materials science and condensed matter physics, Chisinau, 2008. P. 233.
 37. *Khadzhi P.I., Corovai A.V., Markov D.A. et al.* Transmission of ultrashort pulses of laser radiation by thin semiconductor film due to two-photon biexciton generation // Abstracts of 4th International Conference on materials science and condensed matter physics, Chisinau, 2008. P. 225.
 38. *Khadzhi P.I., Corovai A.V., Belousov I.V., Markov D.A.* Interaction of supershort light pulses with thin semiconductor films in exciton range of spectrum // 3rd International conference on physics of electronic materials (Phyem'08), Калуґа, 2008. V. 2. С. 140.
 39. *Khadzhi P.I., Corovai A.V., Markov D.A.* Amplification and lasing at M-band of luminescence // 3rd International conference on physics of electronic materials (Phyem'08), Калуґа, 2008. V. 2. С. 205.
 40. *Хаджи П.И., Коровай А.В., Марков Д.А.* Усиление и лазерная генерация на М-полосе люминесценции // Abstracts of CFM – 2009, Chishinau, 2009. С. 186.
 41. *Хаджи П.И., Розанов Н.Н., Марков Д.А. и др.* Оптический аналог Фешбах–резонанса в пропускании фазово-модулированных УКИ лазерного излучения тонкой плёнкой полупроводника в экситонной области спектра // Abstracts of CFM – 2009, Chishinau, 2009. С. 180.
 42. *Khadzhi P.I., Rosanov N.N., Markov D.A. et al.* Phase-modulated laser light transmission by a thin semiconductor film in the exciton range of spectrum and optical analog of the Feshbach resonance // Abstracts of 5th International Conference MSCMP, Chishinau, 2010. P. 53.
 43. *Khadzhi P.I., Corovai A.V., Belousov I.V., Markov D.A.* Nonlinear transmission of ultrashort laser pulses by a thin semiconductor film under two-photon generation of biexcitons // Abstracts of 5th International Conference MSCMP, Chisinau, 2010. P. 57.
 44. *Хаджи П.И., Коровай А.В., Коровай О.В., Марков Д.А.* Оптическая нутация в системе экситонов, биэкситонов и фотонов // Тези доповідей ІІІ Міжнародної науково–практичної конференції “МЕТІТ-3”, Кременчук, 2008. С. 199.
 45. *Хаджи П.И., Коровай А.В., Белоусов И.В., Марков Д.А.* Пропускание фазово-модулированных ультракоротких импульсов лазерного излучения тонкой плёнкой полупроводника в экситонной области спектра // Тезисы докладов IV Украинской научной конференции физики полупроводников (УНКФП IV), Запорожье, 2009. Т. 1, С. 102.
 46. *Хаджи П.И., Коровай А.В., Марков Д.А.* Генерация (усиление) терагерцового излучения при резонансном возбуждении экситонов в

полупроводниках // Тезисы докладов V Украинской научной конференции физики полупроводников (УНКФП V), Ужгород, 2011. С. 191.

47. *Марков Д.А., Белоусов И.В., Хаджи П.И., Коровай А.В.* Взаимодействие тонкой полупроводниковой пленки с фазово-модулированными УКИ лазерного излучения в экситонной области спектра при высоком уровне возбуждения и оптический аналог Фешбах-резонанса // Тезисы докладов V Украинской научной конференции физики полупроводников (УНКФП V), Ужгород, 2011. С. 217.