

На правах рукописи

Горшков Алексей Павлович

**ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ
НА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ
КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫХ ГЕТЕРОНАНОСТРУКТУР
GaAs/In(Ga)As, ВЫРАЩЕННЫХ ГАЗОФАЗНОЙ
МОС-ГИДРИДНОЙ ЭПИТАКСИЕЙ**

Специальность 01.04.10 – физика полупроводников

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород, 2006 г.

Работа выполнена на кафедре физики полупроводников и оптоэлектроники
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор И.А. Карпович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор П.Б. Болдыревский

доктор физико-математических наук,
профессор Е.С. Демидов

Ведущая организация: Институт физики микроструктур РАН (Н. Новгород)

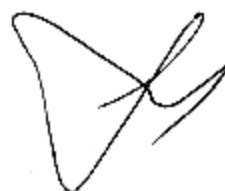
Защита состоится 13 декабря 2006 г. в « 14 » часов на заседании
диссертационного совета Д 212.166.01 при Нижегородском государственном
университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603950, Нижний Новгород,
пр. Гагарина, 23/3, НИФТИ.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского.

Автореферат разослан « 10 » ноября 2006 г.

Отзывы на автореферат направлять по адресу: 603950, Нижний Новгород,
пр. Гагарина, 23/3, НИФТИ.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.166.01
доктор физико-математических наук, профессор



А.И. Машин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Квантово-размерные полупроводниковые гетеронаноструктуры (ГНС) привлекают большое внимание исследователей благодаря своим уникальным физическим свойствам и широким возможностям технического применения в нано- и оптоэлектронике [1, 2]. Особенно большой интерес вызывают ГНС на основе прямозонных полупроводников АЗВ5 с квантовыми ямами (КЯ) и квантовыми точками (КТ), в частности, ГНС на основе гетеропары In(Ga)As/GaAs. Высокая эффективность излучательной рекомбинации в таких структурах позволяет значительно улучшить характеристики светоизлучающих приборов на их основе – светодиодов и лазеров.

Влияние электрического поля на энергетический спектр квантово-размерных слоев, которое называют квантово-размерным эффектом Штарка (КЭШ), представляет значительный интерес в фундаментальном и прикладном отношении. Его исследование позволяет определить дипольный момент неравновесных электронно-дырочных пар, в частности связанных пар – экситонов, который чувствителен к распределению химического состава и поля упругих напряжений в этих слоях. С помощью КЭШ можно управлять спектром оптического поглощения и излучения ГНС. На этом эффекте основана работа быстродействующих электрооптических модуляторов, которые обычно представляют собой многоямную ГНС, встроенную в р-і-п диод.

Цель и основные задачи работы

Основной целью данной работы было изучение методами фотоэлектрической спектроскопии на барьерах полупроводник/металл и полупроводник/электролит влияния электрического поля на энергетический спектр экситонов в КЯ InGaAs/GaAs и КТ InAs/GaAs. Объектом исследования были ГНС, выращенные методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений (МОС) при атмосферном давлении водорода – газа-носителя паров МОС (метод ГФЭ МОС АДВ).

В связи с тем, что ранее методы фотоэлектрической спектроскопии на этих барьерах не применялись для исследования КЭШ и структуры, выращенные методом ГФЭ МОС АДВ, не исследовались в этом отношении, определились следующие основные задачи исследования:

1. Разработка методики исследования влияния электрического поля на фотоэлектрические спектры КЯ и КТ In(Ga)As/GaAs в барьерах полупроводник/металл (барьер Шоттки) и полупроводник/электролит. Выбор этих барьерных структур был обусловлен относительной простотой их изготовления по сравнению с обычно применяемыми р-і-п диодными структурами. Кроме того, система полупроводник/электролит позволяет исследовать ГНС со сверхтонким покровным слоем и даже без него, что невозможно с другими барьерными структурами. Однако, в связи с тем, что

система полупроводник/электролит обладает фотоэлектрохимической активностью, особое внимание было уделено выделению физических эффектов влияния электрического поля в этой системе от фотоэлектрохимических эффектов. Система полупроводник/электролит уникальна также в том отношении, что позволяет осуществлять электрохимическую модификацию поверхности ГНС и контролировать *in situ* влияние этой модификации на фотоэлектрические и фотолюминесцентные спектры ГНС.

2. Исследование квантово-размерного эффекта Штарка на экситонах в гетероструктурах с КЯ (ГКЯ) и КТ (ГКТ) In(Ga)As/GaAs, выращенных ГФЭ МОС АДВ, в частности влияния температуры на спектр экситонов в КЯ и влияния толщины и состава покровного слоя на дипольный момент экситонов в КТ.

3. Исследование температурной зависимости фотоэлектрических спектров ГНС с КТ и КЯ в связи с выяснением механизма эмиссии фотовозбужденных носителей с уровней размерного квантования.

Научная новизна работы

1. Разработана новая методика исследования КЭШ в ГНС с одиночными слоями КЯ и КТ In(Ga)As/GaAs методом фотоэлектрической спектроскопии на барьерах полупроводник/металл (электролит). Выяснены условия, при которых последний метод применим для исследования КЭШ, и показано, что он позволяет исследовать КЭШ в ГНС со сверхтонким покровным слоем (< 5 нм).

2. Обнаружено, что в некоторых ГНС с КЯ InGaAs/GaAs, выращенных ГФЭ МОС АДВ, при низких температурах наряду с обычными экситонами, энергия образования которых уменьшается с ростом напряженности поля, образуются «аномальные» экситоны, энергия образования которых практически не зависит от напряженности поля.

3. На ГНС с КТ InAs/GaAs установлена зависимость величины и знака дипольного момента КТ от толщины и состава тонкого двойного покровного слоя GaAs/InGaAs.

4. Выяснен механизм эмиссии носителей из КТ, встроенных в области пространственного заряда ГНС.

Практическая ценность работы

Результаты работы могут быть использованы для проверки соответствия действительности различных моделей физико-химической структуры КТ, поскольку, теоретическое моделирование такой структуры КТ должно давать не только правильные значения энергии основного перехода, но и более чувствительного к деталям структуры параметра – дипольного момента.

Методики исследования КЭШ на ГНС с одиночными слоями КЯ и КТ могут быть использованы для отработки технологии и определения оптимальных параметров ГНС для электрооптических модуляторов.

По материалам диссертации разработана и поставлена лабораторная работа для студентов «Исследование квантово-размерного эффекта Штарка в гетеронаноструктурах с квантовыми ямами InGaAs/GaAs методом фотоэлектрической спектроскопии»

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. Методы фотоэлектрической спектроскопии на барьерах полупроводника с металлом (электролитом) при выполнении некоторых условий применимы для исследования эффекта Штарка в гетеронаноструктурах GaAs/InGaAs с одиночными слоями КЯ и КТ. Второй метод позволяет изучать энергетические спектры квантово-размерных структур со сверхтонким покровным слоем и даже без него.

2. В структурах с КЯ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$, выращенных ГФЭ МОС АДВ, при низких температурах (ниже ≈ 50 К) обнаружено образование наряду со свободными экситонами, энергетическое положение фотоэлектрического пика от которых зависит от напряжения на барьере, также «аномальных» экситонов, нечувствительных к напряжению на барьере.

3. Дипольный момент экситонов в КТ InAs/GaAs при малых толщинах двойного покровного слоя GaAs/InGaAs зависит от ширины слоя КЯ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ и толщины внешнего слоя GaAs. Нанесение на слой КТ слоя КЯ увеличивает аномальный дипольный момент КТ. Аномальный по знаку при больших толщинах GaAs дипольный момент уменьшается с уменьшением толщины этого слоя и при толщине ≈ 3 нм меняет знак. Эти зависимости дипольного момента связываются с изменениями морфологии, химического состава и поля упругих напряжений в КТ при изменении параметров покровного слоя.

4. В исследованных структурах эмиссия носителей из КТ, расположенных в области пространственного заряда, в матрицу происходит непосредственно с уровней возбуждения до релаксации фотовозбужденных носителей в основное состояние, причем из основного состояния эмиссия идет по термоактивированному туннельному механизму через второй уровень возбуждения.

Личный вклад автора

Автором внесен определяющий вклад в разработку методик исследования и получение основных экспериментальных результатов. Планирование экспериментов, обсуждение и анализ результатов проводились совместно с научным руководителем работы. Исследованные в работе структуры выращены в группе эпитаксиальной технологии НИФТИ Б.Н. Звонковым.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на 26 международной конференции по физике полупроводников «ICPS - 26» (Эдинбург, Великобритания, 2002 г.), Всероссийской конференции «Нанофотоника» (г. Нижний Новгород, 2003, 2005 гг), Всероссийских молодежных конференциях по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике (г. Санкт-Петербург, 2001, 2004 гг.), нижегородских сессиях молодых ученых (г. Нижний Новгород, 2003, 2004, 2005, 2006 гг.).

Публикации

По материалам диссертационной работы опубликованы 20 научных работ: 7 статей и 13 публикаций в материалах конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Общий объем диссертации составляет 134 страницы, включая 90 рисунков. Список цитируемой литературы содержит 91 наименование, список работ автора по теме диссертации 20 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, обозначены цель и задачи данной работы. Показаны её научная новизна, практическая значимость и сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** рассмотрены литературные данные по влиянию электрического поля на энергетический спектр КЯ и КТ In(Ga)As/GaAs и температурной зависимости спектров ГКЯ и ГКТ. Отмечается, что КЭШ на экситонах в КЯ исследовался в основном при комнатной температуре методом оптического поглощения на многоядных структурах, встроенных в p-i-n – диод. В литературе нет сведений о КЭШ в КЯ InGaAs/GaAs и КТ InAs/GaAs, выращенных ГФЭ МОС АДВ, а также о КЭШ в комбинированных слоях КЯ/КТ, в частности о влиянии ширины КЯ и толщины внешнего покровного слоя GaAs на дипольный момент КТ. Последний вопрос особенно интересен, так как изменением толщины покровного слоя можно изменять поле упругих напряжений без изменения химического состава КТ

Во **второй главе** описаны основные типы исследованных ГНС с КЯ и КТ, технология их выращивания ГФЭ МОС АДВ и фотоэлектрическая методика исследования влияния электрического поля на энергетический спектр квантово-размерных слоев.

Особое внимание в этой главе уделено обоснованию применимости методов фотоэлектрической спектроскопии на барьерах ГНС с металлом

(барьер Шоттки) и электролитом (спектроскопия ФБШ и ФПЭ соответственно) для исследования КЭШ. Для создания барьеров с ГНС использовались металлы Au и Pd, в качестве электролита применялся 2М раствор KCl в смеси с глицерином (1:1). Проведено сравнение этих методов на одних и тех же ГНС и показано, что спектры ФБШ и ФПЭ практически совпадают при относительно толстом покровном слое. Однако метод ФПЭ, в отличие от метода ФБШ, позволяет исследовать КЭШ в ГНС с ультратонким покровным слоем (меньше 5 нм) и даже без него. Гашение сигнала ФБШ от КТ в структурах с туннельно тонким покровным слоем объяснено более быстрым туннелированием электронов из КТ в металл, чем в полупроводник.

Исследование вольтамперных и вольтфарадных характеристик двух типов барьеров показало, что при обратном смещении на барьерах они идентичны, определяются уровнем легирования и высотой барьера в полупроводнике (эти параметры определялись из вольтфарадных характеристик) и обычно соответствуют диодной теории барьера Шоттки. В предположении, что встраивание квантово-размерного слоя не нарушает распределение поля, приведены формулы для расчета напряженности электрического поля в этом слое в зависимости от его расположения в области пространственного заряда барьера. Показано, что при специальном профиле легирования ГНС можно получить эти барьеры с довольно широкой областью однородного поля, подобной области однородного поля в p-i-n – диоде.

Влияние постоянного смещения на спектры ФБШ было полностью обратимым. В связи с фотоэлектрохимической активностью системы ГНС/электролит, особое внимание уделено изучению влияния этой активности на спектры ФПЭ и возможности выделения чисто физических эффектов влияния электрического поля в этой системе. Исследованы явления необратимого изменения спектров ФПЭ, которые наблюдались в ГНС с тонким покровным слоем (меньше 10 нм) и связаны с окислением поверхности покровного слоя и дефектообразованием в нем при нахождении ГНС в электролите. Показано, что при сокращении времени снятия спектра ФПЭ и ограничении величины приложенного напряжения можно практически полностью исключить необратимые изменения спектра, связанные с фотоэлектрохимическими процессами на границе ГНС/электролит, даже в структурах со сверхтонким покровным слоем.

В третьей главе приведены результаты изучения КЭШ на экситонах в КЯ методами спектроскопии ФПЭ и ФБШ.

В разделе 3.1 проведена практическая проверка применимости системы полупроводник/электролит для изучения КЭШ в одиночных КЯ InGaAs/GaAs. В структурах с КЯ в области пространственного заряда и в квазинейтральном объеме на спектрах ФПЭ при комнатной температуре наблюдался хорошо выраженный экситонный пик, который с ростом напряженности поля смещался в низкоэнергетическую область (красное смещение), уширялся и полностью расплывался при напряженности поля

$F \approx 100$ кВ/см (рис. 1). Величина смещения экситонного пика квадратично зависит от напряженности поля. Такое поведение экситонного пика качественно и количественно хорошо согласуется с результатами, полученными методом оптического поглощения на многоямных структурах, встроенных в р-і-п – диод [3]. В структурах с поверхностной КЯ (ПКЯ)

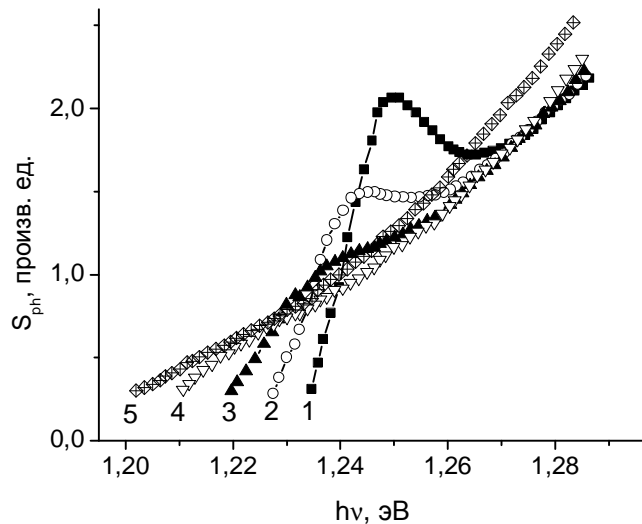


Рис. 1. Влияние поля на спектр ФПЭ от КЯ в ОПЗ. Напряженность поля, кВ/см: 1 - 55, 2 - 90, 3 - 115, 4 - 150, 5 - 180.

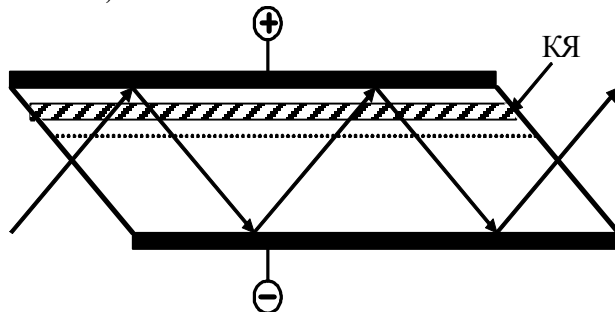


Рис. 2. Схема электрооптического модулятора с барьером Шоттки на ГНС с одной КЯ.

экситонный пик ФПЭ из-за малого времени жизни экситона не наблюдался, и влияние внешнего поля проявлялось в размытии ступенчатого порога фоточувствительности от ПКЯ, связанном с эффектом Франца-Келдыша на межзонных переходах в ПКЯ.

В разделе 3.2 предложена схема оптического модулятора лазерного излучения с барьером Шоттки на структуре с одной КЯ (или с небольшим числом КЯ), в которой используется многократное прохождение излучения через КЯ (рис. 2).

В разделе 3.3 приведены результаты исследования КЭШ на экситонах в КЯ при низких температурах (до 8 К). Основные исследования проведены на ГКЯ с тремя КЯ $In_{0.2}Ga_{0.8}As$ шириной 10, 7 и 5 нм (покровный и спейсерные слои имели толщину 30 нм), встроенными в барьер Шоттки. Спектры ФБШ этой структуры при нескольких температурах приведены на рис. 3. При температурах выше ≈ 50 К во всех КЯ наблюдалось обычное для свободных экситонов красное смещение и уширение экситонного пика с ростом напряженности поля и его исчезновение в достаточно сильных полях (рис. 4). При более низких температурах было обнаружено, что в некоторых КЯ положение экситонного пика перестает зависеть от поля (рис. 5), а в некоторых происходит расщепление экситонного пика на два пика (рис. 6): один ведет себя обычным образом, а другой не смещается с ростом напряженности поля. Установлено, что генерация нечувствительных к полю («аномальных»)

экситонов при низких температурах непосредственно не связана с шириной КЯ и наблюдается не на всех выращенных структурах, а только в некоторых структурах, формирование которых, по-видимому, определяется неконтролируемыми технологическими факторами. Образованию таких структур способствует искусственное введение дефектов в покровный слой путем его частичного анодного окисления.

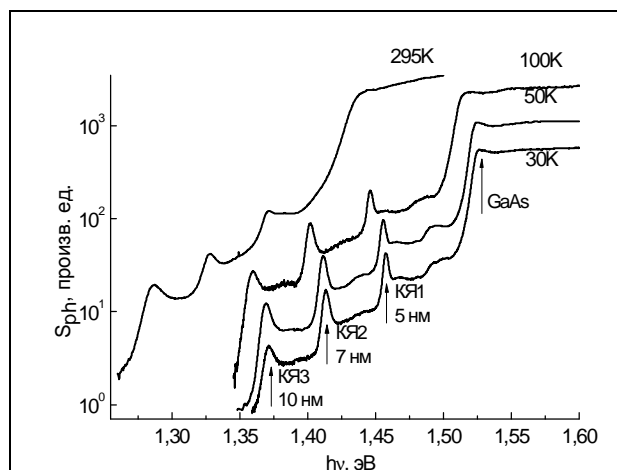


Рис. 3. Влияние температуры на спектр ФБШ структуры с тремя КЯ. Значения ширины КЯ указаны на рисунке.

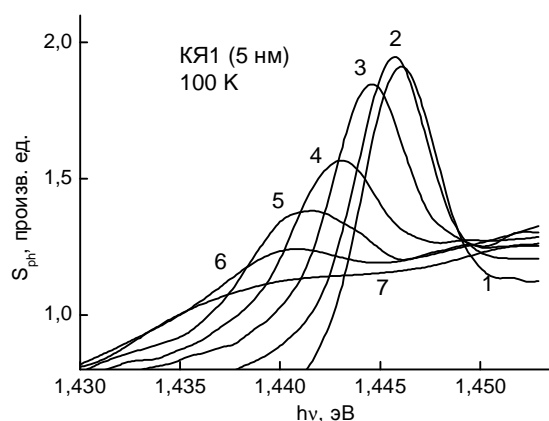


Рис. 4. Влияние электрического поля на спектр ФБШ от КЯ шириной 5 нм при 100 К. F , кВ/см: 1 - 14, 2 - 30, 3 - 45, 4 - 60, 5 - 75, 6 - 90, 7 - 106.

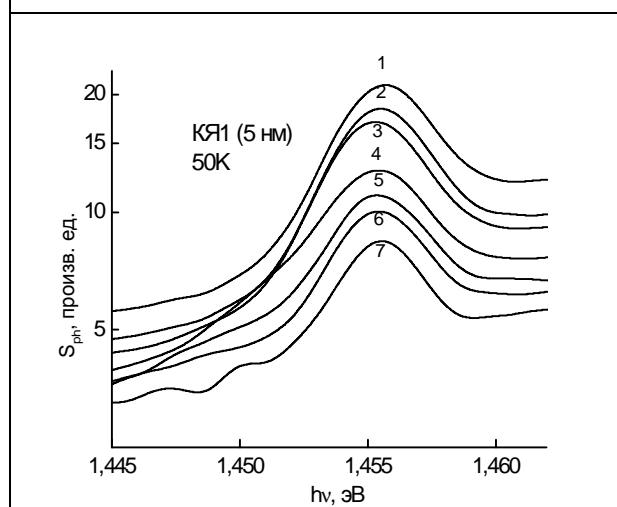


Рис. 5. Влияние электрического поля на спектр ФБШ от КЯ шириной 5 нм при 50 К. F , кВ/см: 1 - 14, 2 - 30, 3 - 37, 4 - 60, 5 - 75, 6 - 90, 7 - 120

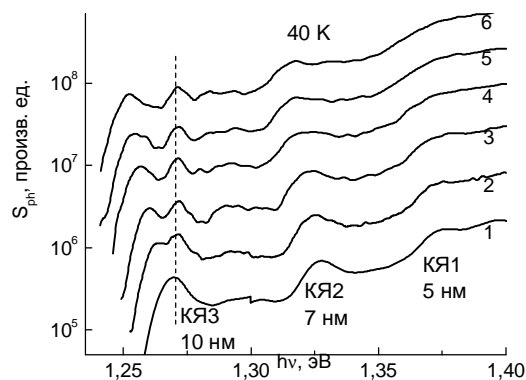


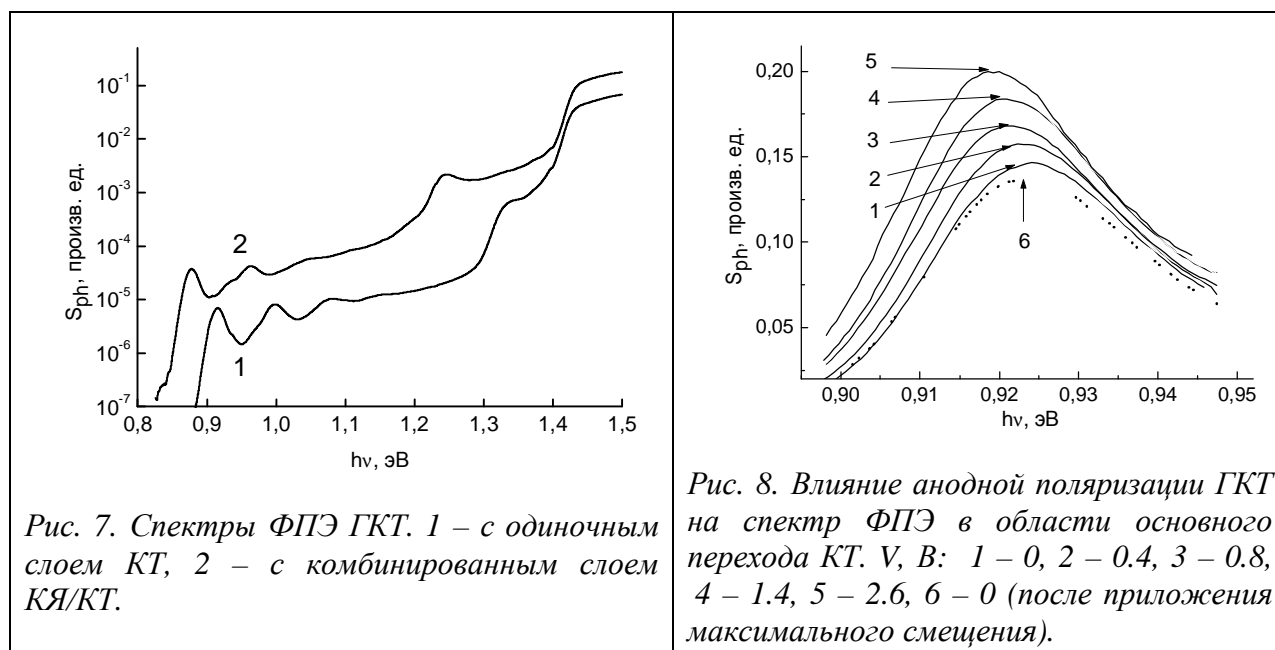
Рис. 6. Влияние электрического поля на спектр ФБШ ГКЯ при 40 К. F (кВ/см): КЯ3 (10 нм): 1 - 80, 2 - 113, 3 - 130, 4 - 150, 5 - 160, 6 - 167; КЯ2 (7 нм): 1 - 57, 2 - 89, 3 - 107, 4 - 125, 5 - 134, 6 - 143; КЯ1 (5 нм): 1 - 80, 2 - 66, 3 - 83, 4 - 103, 5 - 110, 6 - 120. Пунктирная линия показывает положение аномального пика.

Интерпретация природы аномальных экситонов представляет определенные трудности. С помощью моделей экситонов, связанных на простых ионизованных донорах или акцепторах, не удается объяснить их свойства. Высказывается предположение, что они могут быть связаны на донорно-акцепторных ($D^+ - A^-$) парах, образование которых в ГНС n-типа,

выращенных ГФЭ МОС, возможно в результате неконтролируемого легирования структур акцепторной примесью углерода. Выяснение этого вопроса нуждается в дополнительных исследованиях.

В четвертой главе описаны исследования КЭШ на экситонах в ГКТ InAs/GaAs методами спектроскопии ФПЭ и ФБШ при комнатной температуре и температурной зависимости спектров ФБШ в ГНС.

В разделе 4.1 Исследован КЭШ на ГКТ с одиночными слоями КТ и комбинированными слоями КЯ/КТ. Типичные спектры ФПЭ этих структур показаны на рис 7. Обратимый эффект влияния поля на основном переходе КТ, связанный с КЭШ, иллюстрирует рис. 8.



Показано, что в ГКТ n- и p-типа, выращенных ГФЭ МОС АДВ, в одиночных слоях КТ и в комбинированных слоях КЯ/КТ при относительно толстом покровном слое дипольный момент КТ имеет по существующей терминологии [4] аномальный знак (электрон находится ближе к основанию КТ, чем дырка). Это согласуется с данными определения дипольного момента КТ в структурах, выращенных другими методами.

В разделе 4.2 исследовано влияние ширины КЯ InGaAs и толщины внешнего покровного слоя GaAs на дипольный момент КТ в комбинированных слоях КЯ/КТ. Установлено, что нанесение слоя КЯ шириной 2 нм на слой КТ приводит к уменьшению энергии основного перехода примерно на 50 мэВ и к увеличению более чем в 1.5 раза аномального дипольного момента КТ. Величина дипольного момента определялась по наклону зависимости энергии основного перехода КТ от напряженности электрического поля (рис. 9). Увеличение ширины КЯ при тонком покровном слое GaAs (5 нм)

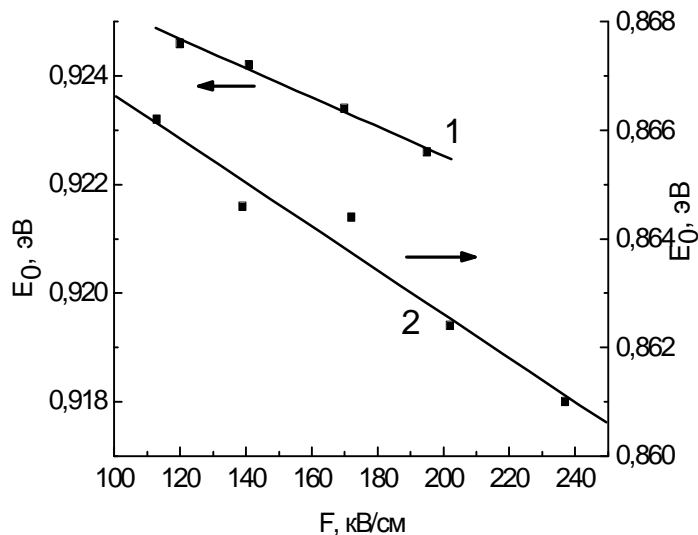


Рис. 9. Влияние нанесения слоя КЯ на слой КТ на энергию основного перехода и дипольный момент КТ. 1 – структура с одиночным слоем КТ ($E_0 = 0.925$ эВ, $l_d = 0.3$ нм); 2 – структура с комбинированным слоем КЯ/КТ ($E_0 = 0.867$ эВ, $l_d = 0.5$ нм). Параметры КЯ: $x = 0.3$, $L_{QW} = 2$ нм, толщина покровного слоя GaAs для обеих структур $d_{GaAs} = 30$ нм.

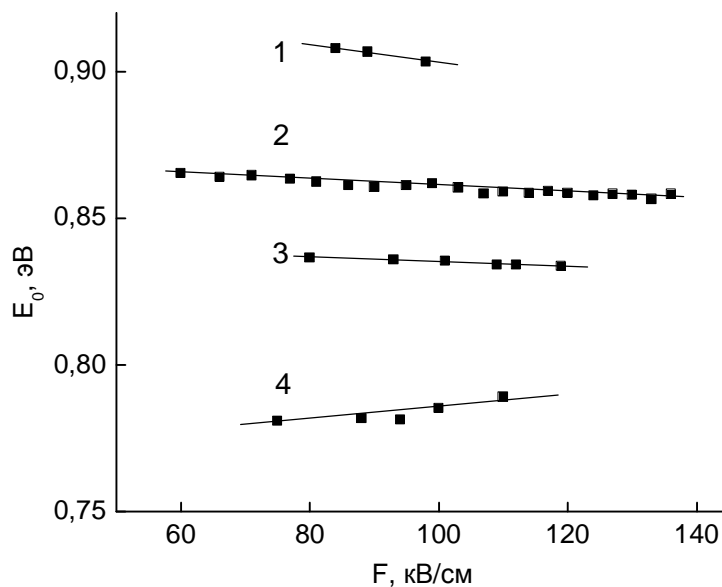


Рис. 10. Влияние толщины покровного слоя GaAs d_{GaAs} в комбинированном слое КЯ/КТ (параметры КЯ $x=0.3$, $L_{QW}=2$ нм) на энергию основного перехода и дипольный момент КТ (в скобках указана длина диполя в КТ. D_{GaAs} , нм: 1 – 30 ($l_d=3$ нм); 2- 10 ($l_d=1$ нм); 3 – – 5 ($l_d=0,7$ нм); 4 – 3 нм, ($d=-3$ нм, дипольный момент ...))

приводило к уменьшению аномального дипольного момента КТ. Анализ влияния нанесения слоя КЯ и ее ширины на дипольный момент КТ в комбинированных слоях КЯ/КТ показал, что оно в основном связано с изменением морфологии и химического состава КТ при нанесении слоя КЯ. Известно, что при нанесении слоя InGaAs процессы роста нанокластеров InAs и диффузионного перемешивания их состава и матрицы протекают существенно по-другому, чем при нанесении слоя GaAs [5].

Установлено, что уменьшение толщины внешнего покровного слоя GaAs от 30 до 3 нм при фиксированных параметрах КЯ уменьшает аномальный дипольный момент и при толщине 3 нм он становится нормальным (рис. 10.). Таким образом, в работе впервые показана возможность получения КТ InAs/GaAs с нормальным по знаку дипольным моментом. Поскольку при изменении толщины внешнего покровного слоя GaAs практически изменяется

только поле упругих напряжений в КТ без изменения химического состава кластеров-КТ, это означает, что упругие напряжения сами по себе влияют на

величину и знак дипольного момента КТ. В работе предложено качественное объяснение механизма влияния упругих напряжений на дипольный момент КТ.

В разделе 4.4 проведен анализ температурной зависимости фотоэдс в квантово-размерных структурах в режиме разомкнутой цепи при различных условиях фотовозбуждения. Установлено, что определить механизм эмиссии неравновесных носителей из температурной зависимости спектра фотоэдс в области поглощения КТ можно при измерении спектра малосигнальной фотоэдс с постоянной подсветкой или в режиме так называемой автоподсветки, который возникает в результате накопления разделенных полем барьера неравновесных носителей при модулированном освещении.

При понижении температуры ниже ≈ 200 К наблюдается уменьшение fotocувствительности от КТ, особенно сильное в области основного перехода E_0 и меньшее в области переходов на первый E_1 и второй E_2 уровни возбуждения (рис. 11). Это означает, что эмиссия фотовозбужденных

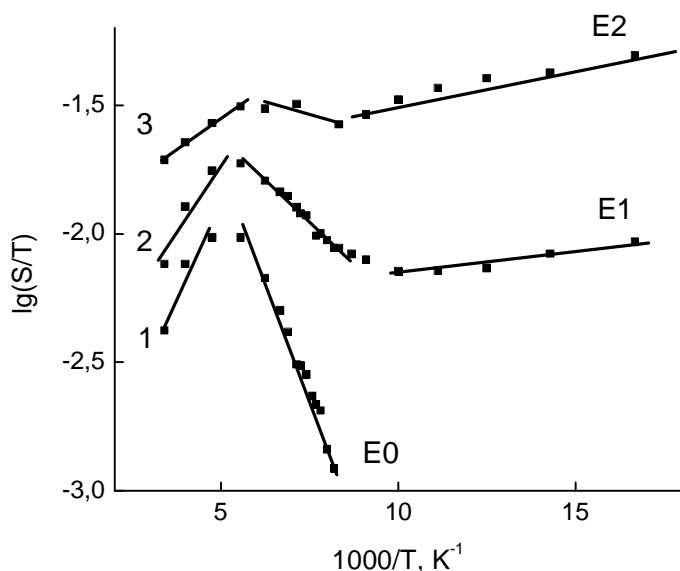


Рис. 11. Влияние энергии квантов фотовозбуждения на температурную зависимость fotocувствительности. 1- фотовозбуждение в области основного перехода E_0 ($E_a=68$ мэВ), 2 - фотовозбуждение в области перехода на первый уровень возбуждения КТ E_1 ($E_a=28$ мэВ), 3 - фотовозбуждение в области перехода на второй уровень возбуждения КТ E_2 ($E_a \approx 0$)

соответствующих состояний приведены в подписи к рисунку. При еще более низких температурах эмиссия из основного состояния практически прекращается, а из первого возбужденного состояния еще заметна по туннельному механизму (кривая 2).

В заключении сформулированы основные результаты диссертации:

1. Установлено, что вольтамперные и вольтфарадные характеристики электролитического контакта с различными электролитами (KCl, HCl, KOH) к ГНС GaAs/In(Ga)As при обратном смещении на барьере совпадают с аналогичными характеристиками металлических контактов (Au, Pd) с барьером Шоттки и описываются диодной теорией барьера Шоттки. Прямые ветви вольтамперных характеристик электролитического контакта отличаются от вольтамперных характеристик металлических контактов значительно бо́льшим значением показателя неидеальности, что связано с падением напряжения в электролите.

2. Обнаружены необратимые эффекты влияния электрического поля на спектры ФПЭ ГНС с тонким (меньше ≈ 10 нм) покровным слоем: деградация спектров при длительной (часы) выдержке ГНС в электролите, необратимое красное смещение спектра после анодной поляризации в ГНС на проводящей подложке и голубое смещение в ГНС на полуизолирующей подложке и др. Эти явления объяснены окислением покровного слоя ГНС и связанными с окислением процессами дефектообразования в покровном слое и релаксации упругих напряжений в КТ.

3. Показано, что при определенных условиях можно практически полностью исключить необратимые эффекты влияния электрического поля на спектры ФПЭ, связанные с фотоэлектрохимической активностью электролитического контакта, и изучать обратимые физические эффекты влияния электрического поля, в частности исследовать эффект Штарка на ГНС с ультратонким покровным слоем и даже без него.

4. Методом спектроскопии ФПЭ показано, что КЭШ на экситонах в одиночной КЯ проявляется в красном смещении и уширении экситонного пика фоточувствительности с ростом напряженности поля в барьере и полном его гашении в достаточно сильных электрических полях в согласии данными исследования КЭШ методом спектроскопии оптического поглощения многоямных структур, встроенных в *rip*-диод. На спектре ФПЭ от поверхностной КЯ экситонный пик фоточувствительности не наблюдается, и КЭШ в этой структуре проявляется в размытии красного границы фоточувствительности от КЯ, которое связывается с эффектом Франца-Келдыша. Практически подтверждена применимость спектроскопии ФПЭ для исследования КЭШ в одиночных КЯ, и выявлены некоторые новые возможности этой методики.

5. Предложена схема оптического модулятора лазерного излучения на одноямной гетероструктуре с барьером Шоттки с использованием явления многократного внутреннего отражения излучения в структуре.

6. Методом спектроскопии ФБШ обнаружено, что в некоторых ГКЯ при температурах ниже ≈ 50 К наблюдается образование наряду с обычными экситонами, энергетическое положение фотоприемного пика от которых зависит от напряженности поля, также «аномальных» экситонов, положение пика от которых практически не зависит от напряженности поля.

7. Установлено, что в некоторых КЯ при низких температурах генерируются только аномальные экситоны, в других КЯ той же структуры – оба типа экситонов. Не обнаружено связи эффекта образования аномальных экситонов с шириной КЯ и особенностями технологии выращивания структур, но установлено, что генерации аномальных экситонов способствует дефектообразование при анодном окислении покровного слоя структуры. Предполагается, что аномальные экситоны могут быть связаны на донорно-акцепторных парах.

8. Показано что методы спектроскопии ФПЭ и ФБШ применимы для исследования эффекта Штарка в ГКТ GaAs/InAs. С применением этих методов показано, что в ГКТ n- и p-типа, выращенных ГФЭ МОС АДВ, с одиночными слоями КТ и комбинированными слоями КЯ/КТ при относительно толстом покровном слое GaAs дипольный момент имеет аномальный знак.

9. Установлено, что наращивание слоя КТ InAs перед нанесением покровного слоя GaAs промежуточным слоем КЯ InGaAs приводит к увеличению аномального дипольного момента КТ, который при тонком внешнем покровном слое GaAs (5 нм) уменьшается с увеличением ширины слоя КЯ, а при толстом покровном слое GaAs (50 нм) слабо возрастает. Влияние промежуточного слоя КЯ в основном связано с изменением морфологии и химического состава КТ при нанесении слоя КЯ.

10. Установлено, что в структурах с комбинированным слоем КЯ/КТ уменьшение толщины внешнего покровного слоя GaAs приводит к уменьшению аномального дипольного момента и при толщине этого слоя 3 нм дипольный момент меняет знак, т. е. становится нормальным. Влияние толщины покровного слоя GaAs на дипольный момент КТ в основном связано с изменением поля упругих напряжений в КТ.

11. Проведен анализ температурной зависимости малосигнальной фотоэдс от КТ при различных условиях фотовозбуждения (с подсветкой и без подсветки), и установлены условия, при которых можно определить энергию активации процесса эмиссии носителей из КТ.

12. Из исследований спектров фотоэдс от КТ, встроенных в барьер Шоттки, при пониженных температурах установлено, что энергия активации фоточувствительности уменьшается с увеличением энергии фотонов возбуждающего излучения, и для оптических переходов на второй уровень возбуждения КТ она становится равной нулю. При фотовозбуждении КТ в области основного и первого возбужденного состояний имеет место термоактивированный туннельный механизм эмиссии электронов через промежуточное состояние на втором уровне возбуждения КТ.

Список цитированной литературы

1. Гетероструктуры с квантовыми точками: получение, свойства, лазеры / Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, В.А. Щукин и др // ФТП. – 1998. Т. 32 – С. 385.
2. Bimberg, D. Quantum dot heterostructures / D. Bimberg, M. Grundmann, N.N. Ledentsov. – N.Y. USA : John Wiley & Sons, 1999 – 338 p.
3. Electric field dependence of optical absorption near the band gap of quantum-well structures / D.A.B. Miller, D.S. Chemla, T.S. Damen et al. // Phys. Rev. B – 1985 – Vol. 32 – P. 1043.
4. Inverted Electron-Hole Alignment in InAs-GaAs Self-Assembled Quantum Dots / P.W. Fry, I.E. Itskevich, D.J. Mowbray et al. // Phys. Rev. Lett. – 2000 – Vol. 84 – P. 733.
5. McGee W.M. Atomic scale structure and morphology of (In, Ga)As-capped InAs quantum dots / W.M. McGee, T.J. Krzyzewski, and T.S. Jones // J. Appl. Phys – 2006 – Vol. 99 – P. 043505.

Основные публикации по теме диссертации

- A1. Фотоэлектрическая спектроскопия гетероструктур с квантовыми точками InAs/GaAs в системе полупроводник/электролит / И.А. Карпович, А.П. Горшков, С.Б. Левичев и др. // ФТП – 2001. – Т. 35 – С. 564.
- A2. Фотоэлектрическая спектроскопия гетероструктур с квантовыми точками InAs/GaAs в системе полупроводник/электролит / И.А. Карпович, С.Б. Левичев, С.В. Морозов, Б.Н. Звонков, Д.О. Филатов, А.П. Горшков, С.Ю. Ермаков // Нанопотоника: Материалы совещания, Н. Новгород, 26-29 марта 2001 г. – Н. Новгород: ИФМ РАН, 2001. – С. 81.
- A3. Горшков А.П. Исследование фотоэлектрических спектров гетероструктур с поверхностными квантовыми точками InAs/GaAs / А.П. Горшков, С.Б. Левичев, И.А. Карпович // III Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников: Материалы конференции, Санкт-Петербург, 5-8 декабря 2001. – Санкт-Петербург, СПбГПУ, 2001. – С. 25.
- A4. Фотоэлектрическая спектроскопия гетероструктур с квантовыми точками InAs/GaAs в системе полупроводник/электролит / И.А. Карпович, С.Б. Левичев, С.В. Морозов, Б.Н. Звонков, Д.О. Филатов, А.П. Горшков, С.Ю. Ермаков // Известия АН, сер. Физическая – 2002. – Т.66 – С. 186.
- A5. Photoelectric spectroscopy of InAs/GaAs quantum dot structures in a semiconductor/electrolyte system / I.A. Karpovich, S.B. Levichev, S.V. Morozov, B.N. Zvonkov, D.O. Filatov, A.P. Gorshkov, S Yu Ermakov // Nanotechnology – 2002, V. 1 – p. 445.
- A6. И.А. Карпович И.А. Исследование эффекта Штарка на экситонах в квантовой яме InGaAs/GaAs методом фотоэлектрической

- спектроскопии в системе полупроводник/электролит И.А. Карпович, А.П. Горшков, Н.В. Байдусь // Труды 2-го рабочего совещания по проекту НАТО SfP-9737799 Полупроводники. Апрель 2002 г. – Н. Новгород: ТАЛИАМ – С. 84.
- A7.** Морфология и фотоэлектронные спектры гетероструктур с поверхностными квантовыми точками InAs/GaAs / А.П. Горшков, С.Б. Левичев, С.В. Морозов, И.А. Карпович // Вестник Нижегородского университета, серия физическая 1(3) – 2002 – С. 54.
- A8.** Morphology, optical and photoelectrical properties of the InAs/GaAs quantum dots grown by Metal Organic Vapor Phase Epitaxy / I.A. Karpovich, N.V. Baius, B.N. Zvonkov, S.V. Morozov, S.B. Levichev, D.O. Filatov, A.V. Zdoroveishev, A.P. Gorshkov // 26th International Conference on the Physics of Semiconductors: Abstracts of the ICPS 26, Edinburgh, Scotland, UK, 29 July –2 August 2002. – Edinburgh: Institute of Physics, 2002. – P. 321.
- A9.** AFM investigation of the buried InAs/GaAs quantum dots with in situ monitoring of etching process by photoelectric and photoluminescence spectroscopy / I.A.Karpovich, A.V.Zdoroveishev, A.P.Gorshkov, D.O.Filatov, R.N.Skvortsov // Scanning Probe Microscopy: Proceedings, N.Novgorod, Russia, March 2-5 2003. – N.Novgorod: IPM RAS, 2003. – P. 98.
- A10.** AFM investigation of the buried InAs/GaAs quantum dots with in situ monitoring of etching process by photoelectric and photoluminescence spectroscopy / I.A.Karpovich, A.V.Zdoroveishev, A.P.Gorshkov, D.O.Filatov, R.N.Skvortsov // Phys. Low-Dim. Struct. – 2003. – V. 3/4. – P. 191
- A11.** Фотоэлектрические свойства диодов Шоттки на основе квантово-размерных структур GaAs/InGaAs/InAs / И.А. Карпович, С.В. Тихов, Н.В. Байдусь, Б.Н. Звонков, А.П. Горшков, Е.Л. Шоболов, // Нанопотоника: Материалы совещания, Н. Новгород, 15-20 марта 2003 г. – Н. Новгород: ИФМ РАН, 2003. – С. 81.
- A12.** Горшков А.П. Квантово-размерный эффект Штарка в гетероструктурах с квантовыми точками InAs/GaAs /А.П. Горшков, И.А. Карпович // Тезисы восьмой нижегородской сессии молодых ученых. Естественнонаучные дисциплины г. Нижний Новгород 25 - 30 апреля 2003 – изд. Гладкова О.В. – 2003 – С. 64.
- A13.** Фотоэлектрические свойства диодов Шоттки на основе квантово-размерных структур GaAs/InGaAs/InAs / И.А. Карпович, С.В. Тихов, Н.В. Байдусь, Б.Н. Звонков, А.П. Горшков, Е.Л. Шоболов, // Известия АН, сер. Физическая – 2004. – Т.68 – С. 90.
- A14.** Управление энергетическим спектром квантовых точек InAs/GaAs изменением толщины и состава тонкого двойного покровного слоя GaAs/InGaAs / И.А. Карпович, Б.Н. Звонков, С.Б. Левичев, Н.В.

Байдусь, С.В. Тихов, Д.О. Филатов, А.П. Горшков, С.Ю. Ермаков. // ФТП – 2004. – Т. 38. – С. 448.

- A15.** Исследование эффекта Штарка в гетеронаноструктурах с квантовыми точками и ямами In(Ga)As/GaAs методом фотоэлектрической спектроскопии / А.П. Горшков, И.А. Карпович, А.В. Кудрин, С.А. Сидорова // VI Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников: Материалы конференции, Санкт-Петербург, 8-10 декабря 2004. – Санкт-Петербург, СПбГПУ, 2004. – С. 61.
- A16.** Исследование эффекта Штарка в гетеронаноструктурах с квантовыми точками InAs/GaAs методом фотоэлектрической спектроскопии на барьере полупроводник/электролит / А.П. Горшков, М.В. Арушанова, А.В. Кудрин, И.А. Карпович // Тезисы девятой нижегородской сессии молодых ученых. Естественнонаучные дисциплины, г. Нижний Новгород, 25 - 30 апреля 2004 – изд. Гладкова О.В. – 2004 – С 81.
- A17.** Горшков А.П. Исследование эффекта Штарка в гетеронаноструктурах с квантовыми точками и ямами In(Ga)As/GaAs методом фотоэлектрической спектроскопии / А.П. Горшков, И.А. Карпович, А.В. Кудрин // Нанопизика и наноэлектроника: Материалы симпозиума, Н. Новгород, 25-29 марта 2005 г. – Н. Новгород: ИФМ РАН, 2005. – С. 316.
- A18.** Кудрин А.В. Исследование эффекта Штарка в гетеронаноструктурах с квантовыми точками InAs/GaAs методом фотоэлектрической спектроскопии / А.В. Кудрин, И.А. Карпович, А.П. Горшков // Тезисы десятой нижегородской сессии молодых ученых. Естественнонаучные дисциплины г. Нижний Новгород, 17- 22 апреля 2005 – С. 32.
- A19.** Горшков А.П. Исследование влияния электрического поля на спектры фоточувствительности квантовых ям In(Ga)As/GaAs при низких температурах / А.П. Горшков, С.А. Сидорова, И.А. Карпович // Тезисы десятой нижегородской сессии молодых ученых. Естественнонаучные дисциплины, г. Нижний Новгород, 17- 22 апреля 2005 – С. 52.
- A20.** А.П. Горшков Исследование эффекта Штарка в гетеронаноструктурах с квантовыми точками и ямами In(Ga)As/GaAs методом фотоэлектрической спектроскопии / А.П. Горшков, И.А. Карпович, А.В. Кудрин // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования – 2006 – № 5 – С. 25.