

На правах рукописи

Истомин Леонид Анатольевич

**ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ И ЭФФЕКТ ПОЛЯ В  
КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫХ ГЕТЕРОНАНОСТРУКТУРАХ  
In(Ga)As/GaAs, ВЫРАЩЕННЫХ ГАЗОФАЗНОЙ  
ЭПИТАКСИЕЙ**

Специальность 01.04.10 – физика полупроводников

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород, 2010 г.

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

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор Карпович Игорь Алексеевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор Болдыревский Павел Борисович

доктор физико-математических наук,  
профессор Тетельбаум Давид Исаакович

Ведущая организация: Институт физики микроструктур РАН

Защита состоится 19 января 2011 года в 14 - 00 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 16 декабря 2010 года.

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

В последние годы не ослабевает интерес исследователей к изучению свойств квантово-размерных гетеронаноструктур (КРС) на основе прямозонных полупроводников АЗВ5, в частности КРС типа InGaAs/GaAs с квантовыми ямами (КЯ) и самоорганизованными квантовыми точками (КТ). Помимо интереса к фундаментальным свойствам этих КРС, ведутся и прикладные исследования, связанные с применением КРС в приборах опто- и нанoeлектроники [1, 2], элементов памяти [3, 4], приборах спинтроники [5].

Одной из важнейших характеристик КРС является их энергетический спектр, причем не только спектр размерного квантования, но и спектр примесно-дефектных центров в структуре, которые могут существенно влиять на оптоэлектронные свойства КРС. Такие центры могут возникать при выращивании КРС, встраивании квантово-размерных слоев в матрицу, селективном легировании, создании контактов из химически активных металлов и при некоторых других технологических операциях. В связи с этим развитие методов диагностики энергетического спектра КРС и изучение их энергетического спектра в связи с технологией выращивания КРС было и остается актуальной задачей.

### Цель и основные задачи работы

Основной целью данной работы является изучение энергетического спектра собственных и примесно-дефектных состояний и некоторых оптоэлектронных характеристик КРС с КЯ и КТ типа In(Ga)As/GaAs методами фотоэлектрической спектроскопии и динамического эффекта поля (ДЭП). Последний метод разработан и применен для исследования КРС впервые. Объектом исследования были КРС, выращенные методом газовой фазной эпитаксии из металлорганических соединений (МОС) при атмосферном давлении водорода – газа-носителя паров МОС (метод ГФЭ МОС АДВ).

В работе решались следующие основные задачи:

1. Выяснение на ряде модельных КРС с КТ и КЯ особенностей применения и диагностических возможностей разных методик фотоэлектрической спектроскопии: спектроскопии планарной фотопроводимости (ФП), спектроскопии фотоэдс (фототока) на барьере КРС/металл – барьере Шоттки (ФБШ), фотоэдс (фототока) на барьере КРС/электролит (ФПЭ), фотоэдс на барьере КРС/диэлектрик (конденсаторной фотоэдс, КФЭ).

2. Исследование методами фотоэлектрической спектроскопии генерации дефектов при выращивании КРС методом ГФЭ МОС АДВ, нанесении ферромагнитного Со контакта на поверхность КРС и встраивании  $\delta$ -слоя Mn в КРС с КЯ и КТ In(Ga)As/GaAs. Полупроводниковые структуры с ферромагнитными слоями представляют интерес для спинтроники.

3. Разработка методики исследования динамического эффекта поля (ДЭП) в КРС и изучение основных закономерностей ДЭП в КРС с КТ и КЯ, в частности влияния на характеристики эффекта поля типа и места расположения квантово-размерных слоев, дельта-легирования КРС марганцем.

#### **Научная новизна работы**

1. На ряде модельных КРС с разным типом и местом расположения квантово-размерных слоев проведено комплексное исследование диагностических возможностей и особенностей применения разных методик фотоэлектрической спектроскопии: фотовольтаического эффекта на барьерах КРС с металлом, жидким электролитом и диэлектриком, планарной фотопроводимости.

2. Впервые методами фотоэлектрической спектроскопии исследовано низкотемпературное дефектообразование при нанесении на КРС ферромагнитного металла Со.

3. Впервые исследован эффект поля в КРС с КЯ и КТ In(Ga)As/GaAs, Разработана новая методика исследования динамического эффекта поля. С применением методик ДЭП и спектроскопии малосигнального эффекта поля установлены закономерности влияния квантово-размерных слоев и дельта-слоя Mn на характеристики эффекта поля. Выявлены возможности определения из характеристик эффекта поля ряда параметров КРС.

#### **Практическая ценность работы**

Результаты работы могут быть использованы для экспресс-анализа качества выращенных КРС и усовершенствования технологии ГФЭ МОС при создании приборных структур. Метод ДЭП может быть использован для диагностики процессов медленного захвата носителей на ловушки и определения высоты эмиссионного барьера в КТ, а также для определения дрейфовой подвижности носителей в одиночных КЯ. Частично эти методики применяются в ННГУ при выращивании КРС.

#### **На защиту выносятся следующие основные положения:**

1. Комплексное применение методик фотоэлектрической спектроскопии квантово-размерных структур (фотовольтаического эффекта на барьерах КРС с металлом, жидким электролитом, диэлектриком и планарной фотопроводимости) позволяет определять собственный и примесно-дефектный энергетический спектр сложных структур со слоями квантовых точек и квантовых ям, расположенными практически в любом месте структуры от поверхности до внутренней границы КРС/подложка. При анализе спектров планарной фотопроводимости необходимо учитывать барьерный механизм фотопроводимости как на поверхностном, так и на внутреннем барьере КРС/подложка.

2. Динамический эффект поля является эффективным методом изучения про-

цессов захвата неравновесных основных носителей в квантово-размерные слои и дефектные состояния в квантово-размерных структурах. Метод позволяет определять концентрацию центров захвата и высоту эмиссионного барьера в квантовых точках, дрейфовую подвижность основных носителей в одиночных квантовых ямах и некоторые другие характеристики квантово-размерных структур.

3. При газофазной МОС-гидридной эпитаксии, нанесении ферромагнитного  $\text{Co}$  контакта, встраивании дельта-слоя  $\text{Mn}$  в квантово-размерные структуры  $\text{In}(\text{Ga})\text{As}/\text{GaAs}$  генерируются дефекты с глубокими уровнями, существенно влияющие на оптоэлектронные характеристики структур. Определены некоторые электронные параметры этих дефектов.

### **Личный вклад автора**

Автором внесен определяющий вклад в получение основных экспериментальных результатов. Планирование экспериментов, обсуждение и анализ результатов проводились совместно с научным руководителем работы проф. И.А. Карповичем. Часть результатов по ДЭП получена совместно с доц. С.В. Тиховым. Исследованные в работе структуры выращены в группе эпитаксиальной технологии НИФТИ ННГУ Б.Н. Звонковым.

### **Апробация работы**

Основные результаты работы докладывались на 9 всероссийской конференции  $\text{GaAs} - 2006$  «Арсенид галлия и полупроводниковые соединения группы III-V» (г. Томск, 2006 г.), 7 Российской конференции по физике полупроводников «Полупроводники 2007» (г. Екатеринбург, 2007 г.), Всероссийских молодежных конференциях по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике (г. С. Петербург, 2006, 2007 г.), 12 и 14 международных симпозиумах «Нанозифика и нанозлектроника» (г. Нижний Новгород, 2008, 2010 г.), 6 всероссийской молодежной научной школы (г. Саранск, 2007 г.), нижегородских сессиях молодых ученых (г. Н. Новгород, 2006, 2007, 2008 г.г.), 8 конференции «Высоко-чистые вещества и материалы. Получение, анализ, применение» (г. Нижний Новгород, 2007 г.).

### **Публикации**

По материалам диссертационной работы опубликованы 17 научных работ: 5 статей, входящих в перечень ВАК, и 12 публикаций в материалах конференций.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Общий объем диссертации составляет 137 страниц, включая 53 рисунка. Список цитируемой литературы содержит 106 наименований, список работ автора по теме диссертации 17 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.

Во **первой главе** содержится обзор литературы по фотоэлектрическим явлениям в КРС, и их применению для диагностики энергетического спектра КРС. Отмечается, что ранее не проводилось сравнительного исследования диагностических возможностей разных фотоэлектрических методик на одних и тех же структурах. Приведены литературные данные по исследованию дефектообразования при нанесении химически активных металлов на поверхность КРС и анодном окислении структур с применением методик фотоэлектрической спектроскопии. Также рассмотрены данные о методах диагностики параметров глубоких состояний в структурах с КТ InAs/GaAs методами емкостной спектроскопии, а так же о транспортных свойствах структур с одиночными слоями КЯ InGaAs/GaAs.

Во **второй главе** описаны основные типы исследованных модельных КРС с квантовыми ямами, квантовыми точками и комбинированными слоями КЯ/КТ In(Ga)As/GaAs и условия их выращивания методом ГФЭ МОС АДВ. Структуры с дельта-слоем Mn выращивались этим методом в комбинации с выращиванием части структуры (дельта-слоя Mn и покровного слоя GaAs) лазерным распылением соответствующих мишеней.

Описаны использованные в работе фотоэлектрические методики диагностики энергетического спектра КРС: ФП, ФБШ, ФПЭ, КФЭ. В методике ФПЭ в качестве электролита использовался двухмолярный раствор KCl в смеси с глицерином в соотношении 1:1. В методике КФЭ наряду с разборным МДП-конденсатором с пластинкой слюды в качестве диэлектрика использовался ЭДП конденсатор с полуизолирующей подложкой (s-GaAs) в качестве диэлектрика и электролитическим контактом к ней.

В работе использовались две методики исследования эффекта поля: разработанная нами методика нестационарного динамического эффекта поля (ДЭП), описанная ниже, и методика спектроскопии малосигнального эффекта поля (МЭП) Монтгомери-Эгрейна [6]. Эффект поля изучался в разборном МДП-конденсаторе типа полевого транзистора. Одной обкладкой конденсатора служила КРС, выращенная на полуизолирующей подложке, с двумя планарными омическими контактами. К КРС прижималась пластинка слюды толщиной 10–30 мкм с нанесенным на ее внешнюю поверхность полупрозрачным металлическим слоем, служившим второй обкладкой конденсатора. Одно из достоинств такой системы состоит в том, что емкость разборной МДП структуры  $C_g$  практически не зависит от поверхностной емкости КРС, а определяется емкостью слюдяного конденсатора. При этом инжектированный в КРС заряд линейно зависит от напряжения на управляющем электроде  $V_g(t)$ . Разборная структура

позволяет модифицировать поверхность КРС и исследовать влияние модификации на эффект поля.

В **третьей главе** приведены результаты исследования фотоэлектрических спектров ряда модельных КРС с применением разных методик фотоэлектрической спектроскопии.

В разделе 3.1 изучены спектры фотовольтаического эффекта на барьере КРС/электролит (ФПЭ) и планарной ФП двух типов КРС. Одна КРС (5432) имела слой КЯ1 ( $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ , 7 нм) на расстоянии 100 нм от металлургической границы внутреннего n-s-барьера (буферный слой n-GaAs/полуизолирующая s-GaAs подложка) и комбинированный слой КЯ2 ( $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ , 5 нм)/КТ InAs в поверхностном барьере на расстоянии 30 нм от поверхности. Буферный слой n-GaAs с концентрацией электронов  $\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$  имел толщину 1 мкм. Вторая КРС (5434) отличалась от первой только отсутствием КЯ1 вблизи внутреннего барьера. Спектры структур приведены на рис. 1.

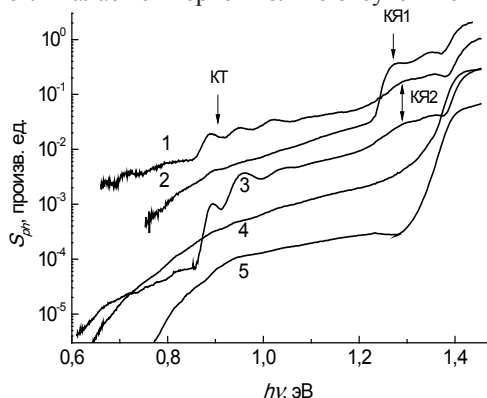


Рис. 1. Спектры ФПЭ (1, 3, 5) и ФП (2, 4) структур 5432 (1, 2), 5434 (3, 4) и s-GaAs подложки (5).

в поверхностный барьер КТ и КЯ2 практически незаметны на фоне широкой полосы примесной ФП. Однако на ее фоне хорошо выявляется КЯ1 (кривая 2), встроенная вблизи n-s-барьера. Эти особенности спектра ФП обусловлены барьерной природой фотопроводимости эпитаксиальных слоев полупроводников типа GaAs и КРС на их основе [8]. В них кроме объемной ФП, связанной оптической генерацией неравновесных носителей в полупроводнике, существенную роль играет барьерная ФП (БФП). Она обусловлена пространственным разделением неравновесных электронно-дырочных пар на поверхностном и внутреннем барьерах, приводящим к увеличению ширины квазинейтральной области. В КРС 5432 в ФП доминируют объемная фотопроводимость и БФП на внутреннем барьере, что приводит к отсутствию на спектре признаков слоя КЯ2/КТ, встроенного в поверхностный барьер и яркому проявлению КЯ1, встро-

тры структур приведены на рис. 1.

На спектрах ФПЭ обеих КРС (кривые 1, 3) на фоне слабой полосы примесной фоточувствительности с порогом  $\approx 0,65$  эВ хорошо выявляется энергетический спектр КТ в слое КЯ/КТ с энергией основного перехода около 0,9 эВ и двумя уровнями возбуждения, а также спектр так называемой гибридной КЯ в слое КЯ/КТ. Она образуется в пространстве между КТ из КЯ смачивающего слоя InAs и внешней КЯ2 [7] и обозначена как КЯ2.

На спектрах ФП (кривые 2, 4) спектры встроенных

енной во внутренний n-s - барьер. Как видно из сравнения кривых 2 и 5, примесная ФП с порогом  $\approx 0,75$  эВ на кривой 2 обусловлена фотовозбуждением центров EL2 в полуизолирующей подложке.

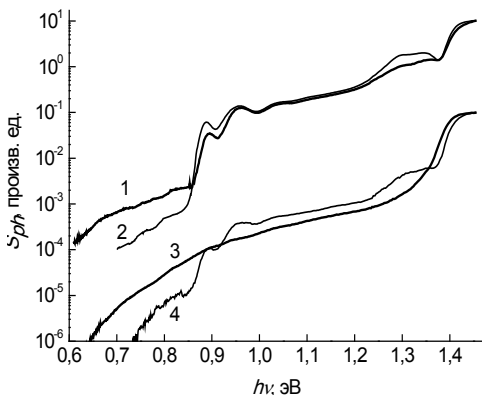


Рис. 2. Эволюция спектров ФПЭ (1, 2) и ФП (3, 4) структуры 5434 после выращивания. 1, 3 – измерения через 10 дней после выращивания, 2, 4 – измерения через 20 дней.

Более длинноволновая примесная ФП в структуре 5434 (кривая 4) и примесная ФПЭ в обеих структурах (кривые 1 и 3) обусловлена образованием при МОС-гидридной эпитаксии дефектов с глубоким уровнем  $E_c - 0,65$  эВ в самой КРС. Об этом свидетельствует тот факт, что эта полоса наиболее ярко проявляется в свежеприготовленных структурах. Как показывает эволюция спектров (рис. 2), при хранении структур в обычных условиях она значительно уменьшается, что указывает на нестабильность этих дефектов. При этом на спектрах ФП начинает отчетливо проявляться энергетический спектр от слоя КЯ/КТ (кривая 4).

В этом разделе также показано, что в ЭДП конденсаторе с подложкой s-GaAs в качестве диэлектрика на спектре КФЭ выявляется КЯ1, т.е. эта методика КФЭ может использоваться для диагностики квантово-размерных слоев, встроенных вблизи внутреннего n-s-барьера структуры.

В разделе 3.2 приведены результаты исследований методами спектроскопии ФБШ и ФПЭ низкотемпературного дефектообразования при осаждении на поверхность образца Со электрода при  $100$  °С. Дефекты образуются в результате химического взаимодействия Со с GaAs. При нанесении электролитического контакта заметного дефектообразования не происходит. Поэтому сравнение спектров ФБШ и ФПЭ позволяет обнаружить появление фотоэлектрически активных дефектов при нанесении металлического контакта.

Нанесение Со контакта на КРС с тремя КЯ, встроенными вблизи поверхности, приводит к появлению на спектре ФБШ полосы с порогом  $\approx 0,75$  эВ (рис. 3, кривая 2). Ее анализ показал, что поверхностная концентрация этих дефектов  $\sim 10^{11}$  см $^{-2}$ , усредненная объемная концентрация в слое толщиной 30 нм  $\sim 10^{17}$  см $^{-3}$  и принадлежит она центрам EL2.

Напряженные КЯ способны задерживать проникновение дефектов, которые генерируются на поверхности КРС. Как показали эксперименты на структурах с комбинированным слоем КЯ/КТ, влияние дефектов при нанесении Со на спектр



КТ пропадает уже при покровном слое толщиной 20 нм, тогда как на КРС со слоем КТ, не покрытым слоем КЯ, оно перестает проявляться только при толщине покровного слоя 300 нм.

В заключительном разделе третьей главы исследовано влияние встраивания в КРС  $\delta$ -слоя Мп в зависимости от толщины спейсерного слоя между  $\delta$ -слоем

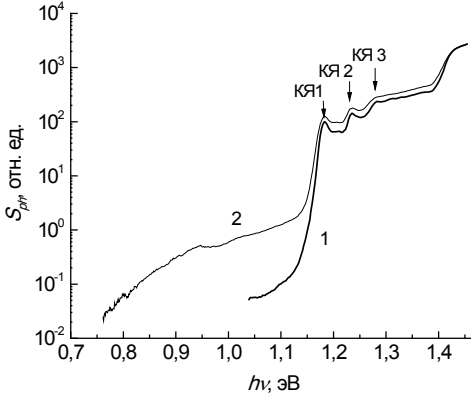


Рис. 3. Влияние нанесения  $Co$  контакта при  $100^\circ C$  на спектр фоточувствительности КРС с тремя КЯ. 1 – КРС с электролитическим контактом, 2 – КРС с  $Co$  контактом.

и слоем КЯ (КТ). Обнаружено, что уменьшение толщины спейсера приводит к уменьшению фоточувствительности в области поглощения КЯ (КТ) вплоть до полного ее исчезновения при толщинах  $\approx 1$  и  $\approx 10$  нм в КРС с КЯ и КТ соответственно. Эффект подавления фоточувствительности от КЯ (КТ) при встраивании  $\delta$ -слоя Мп связывается с диффузионным размытием примесно-дефектного  $\delta$ -слоя и проникновением или образованием дефектов в КЯ (КТ), увеличивающих скорость рекомбинации неравновесных носителей. Это приводит к уменьшению эффективности их эмиссии из квантово-размерных слоев, определяющей фоточувствительность. Более сильное проявление этого эффекта в КРС с КТ обусловлено тем, что, во-первых, величина упругих напряжений на интерфейсе КТ, способствующих дефектообразованию, больше, чем на интерфейсе КЯ, и, во-вторых, тем, что из-за большей высоты эмиссионного барьера в КТ эмиссионное время жизни фотовозбужденных носителей в КТ больше, чем в КЯ.

В **четвертой главе** приведены результаты исследования эффекта поля в однородных слоях  $n$ - и  $p$ -GaAs, в КРС In(Ga)As/GaAs с КТ и КЯ, а так же в КРС, содержащих дельта-слой Мп.

В разделе 4.1 описан разработанный метод динамического эффекта поля, ДЭП. Он характеризует зависимость квазиповерхностной проводимости полупроводника  $\sigma_s$  в эффекте поля от периодического переменного напряжения  $V_g(t)$  на управляющем электроде (затворе) МДП-структуры, т.е. зависимость  $\sigma_s(V_g(t))$ . В общем случае эта зависимость имеет вид петли гистерезиса, так как она определяется не только мгновенным значением напряжения  $V_g(t)$ , но и кинетикой эффекта поля, связанной с захватом инжектированных носителей на поверхностные и объемные ловушки и их эмиссией из этих ловушек. Особенностью разработанной методики ДЭП является использование монополярного пульсирующего напряжения  $V_g(t)$  (показано на вставке рис. 4), инжектирующего основные носи-

тели в полупроводник, что облегчает анализ ДЭП. Частота пульсирующего напряжения, полученного выпрямлением обычного переменного напряжения, выбиралась такой, чтобы наблюдалась петля гистерезиса (обычно 100 Гц). Для исследования ДЭП разработана установка с цифровой записью кривых ДЭП.

Захват инжектированных основных носителей в эффекте поля удобно характеризовать величиной подвижности в эффекте поля

$$\mu_F = d\sigma_s/dQ_s = \mu_d C_g^{-1} (d\sigma_s/dV_g) = \mu_D q,$$

где  $Q_s = dQ_{sv} + dQ_{ss}$  – инжектированный заряд, состоящий из заряда свободных носителей  $dQ_{sv}$  и заряда связанных на любых локализованных состояниях в области пространственного заряда (ОПЗ) носителей  $dQ_{ss}$ ,  $\mu_D$  – дрейфовая подвижность основных носителей на границе ОПЗ обедненного слоя с квазинейтральной областью (КНО),  $C_g$  – удельная емкость МДП-структуры,  $\theta = dQ_{sv}/dQ_s$  – так называемый фактор захвата.

На рис. 4 приведены типичные кривые ДЭП в разборной МДП-структуре. В отсутствие захвата на ловушки ( $\theta = 1$ ) имеет место квазистационарный линейный ДЭП (кривая 1),  $\Delta\sigma_s \sim V_g(t)$  и наклон этой зависимости определяется значением  $\mu_D$ . Захват носителей на поверхностные и объемные ловушки, а также в дискретные

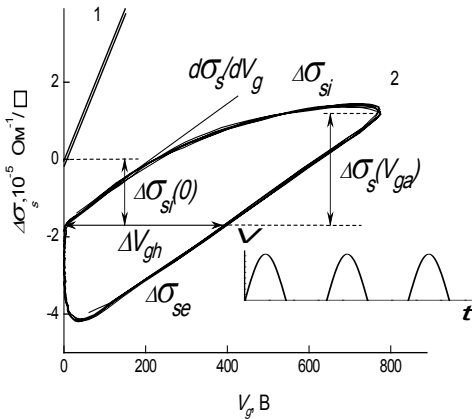


Рис. 4. Типичные кривые ДЭП: 1 – при отсутствии захвата на ловушки (квазистационарный ДЭП), 2 – при наличии захвата на ловушки (нестационарный ДЭП).

квантово-размерные состояния в ОПЗ приводит к уменьшению наклона динамической зависимости  $\Delta\sigma_s(V_g(t))$  и появлению на ней петли гистерезиса на частотах измерения  $f \sim (2\pi\tau)^{-1}$ , где  $\tau$  – время релаксации процесса захвата (кривая 2). Верхняя ветвь петли гистерезиса  $\Delta\sigma_{si}$  определяет изменение  $\sigma_s$  при инжекции, нижняя ветвь  $\Delta\sigma_{se}$  – при экстракции инжектированных основных носителей. Вертикальный участок петли описывает релаксацию  $\Delta\sigma_{se}(t)$  в полупериоды, когда  $V_g(t) = 0$ . Захват носителей на кривой ДЭП характеризуют значения подвижности на начальном участке кривой инжекции  $\mu_F(0)$  (относительно быстрый захват) и при амплитудном значении напряжения  $\mu_F(V_g)$  (захват за весь период инжекции), величина  $\Delta\sigma_{si}(0)$  – изменение начального значения проводимости при  $V_g = 0$  и  $\Delta V_{gh}$  – ширина петли гистерезиса между значениями проводимости на кривой инжекции  $\Delta\sigma_{si}(0)$  и на кривой экстракции  $\Delta\sigma_{se}(\Delta V_{gh})$ . Величина  $\Delta\sigma_{si}(0)$  характеризует эффект накопления заряда на поверхностных состояниях (ПС) при периодическом действии монополярного напряжения. Величина  $\Delta V_{gh}$

квантово-размерные состояния в ОПЗ приводит к уменьшению наклона динамической зависимости  $\Delta\sigma_s(V_g(t))$  и появлению на ней петли гистерезиса на частотах измерения  $f \sim (2\pi\tau)^{-1}$ , где  $\tau$  – время релаксации процесса захвата (кривая 2). Верхняя ветвь петли гистерезиса  $\Delta\sigma_{si}$  определяет изменение  $\sigma_s$  при инжекции, нижняя ветвь  $\Delta\sigma_{se}$  – при экстракции инжектированных основных носителей. Вертикальный участок петли описывает релаксацию  $\Delta\sigma_{se}(t)$  в полупериоды, когда  $V_g(t) = 0$ . Захват носителей на кривой ДЭП характеризуют значения подвижности на начальном участке кривой инжекции  $\mu_F(0)$  (относительно быстрый захват) и при амплитудном значении напряжения  $\mu_F(V_g)$  (захват за

определяет поверхностный заряд  $\Delta Q_{st}$  захваченных за время инжекции носителей, которые не успевают перейти в зону проводимости при уменьшении напряжения до значения  $\Delta V_{gh}$ :

$$\Delta Q_{st} = C_g \Delta V_{gh} = q \Delta n_{st},$$

где  $\Delta n_{st}$  –поверхностная концентрация связанных инжектированных носителей.

В разделе 4.2 описаны исследования ДЭП и спектров МЭП в однородных слоях n- и p-GaAs. Рис. 5 показывает ДЭП в однородном слое n-GaAs и влияние на ДЭП освещения слоя.

На кривых ДЭП однородных слоев n - GaAs (кривая 1) гистерезис очень мал ( $\Delta V_{gh} < 10$  В). Подвижность  $\mu_F(0)$  близка к значениям холловской подвижности

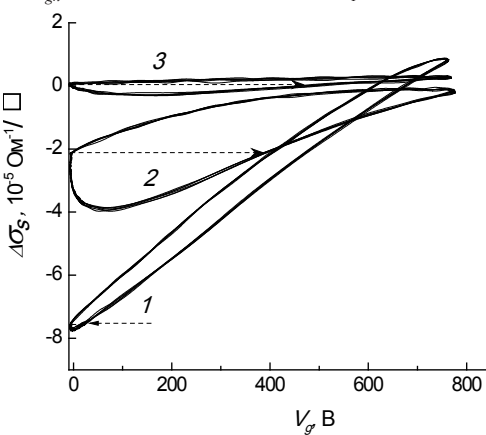


Рис. 5. Влияние освещения на ДЭП в однородном слое n-GaAs (№ 4878). Интенсивность освещения: 1 – в темноте, 2 – 10 %, 3 – 100 %.

а ширина петли гистерезиса увеличивается почти до 300 В ( $\Delta V_{gh} \sim \ln L$ ). Таким образом, в однородных слоях захват инжектированных носителей на ПС происходит в результате их термического заброса через поверхностный барьер.

В разделе 4.3 приведены результаты исследования ДЭП в КРС n-типа с КТ (рис. 6). ДЭП в структурах с КТ характеризуется значительно меньшим, чем в однородном слое, значением  $\mu_F(0) \approx 1500 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с} \ll \mu_H = 4800 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  и большим значением ширины петли гистерезиса. Это свидетельствует о появлении быстрого захвата электронов в слой КТ. Видно, что увеличение  $d_c$ , т.е. удаление слоя КТ от поверхности, приводит к закономерному уменьшению наклона кривой инжекции и к увеличению ширины петли гистерезиса. Оба эффекта обусловлены снижением высоты поверхностного барьера, препятствующего захвату электронов на локализованные состояния в слое КТ. Наиболее ярко эти эффекты проявляются при толщине

основных носителей и высокочастотной подвижности  $\mu_F$  в МЭП. Это означает, что захвата инжектированных электронов на ПС почти не происходит, что объясняется большой высотой поверхностного барьера в GaAs ( $\approx 0,6$  эВ), препятствующего захвату. Это подтверждает и влияние на ДЭП освещения структуры. Освещение уменьшает высоту этого барьера на величину поверхностной фотоэдс  $V_\phi$ , зависимость которой от интенсивности освещения  $L$  имеет вид  $V_\phi = (kT/q) \ln(1+BL)$ . При максимальной интенсивности освещения (кривая 3)  $V_\phi$  достигает 0,4 – 0,5 В. В результате уменьшения высоты барьера  $\mu_F(0)$  уменьшается на порядок,

покрывного слоя 300 нм (кривая 5), когда слой КТ встроен вблизи границы ОПЗ с КНО структуры. Оценка поверхностной концентрации захваченных электронов

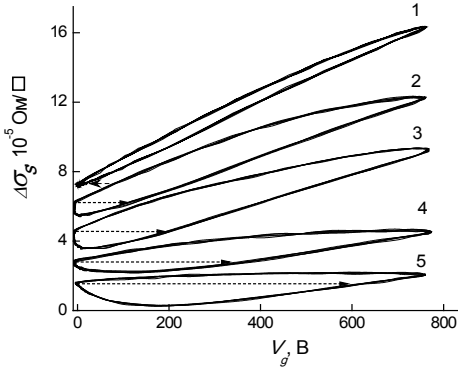


Рис. 6. Влияние на ДЭП в КРС с КТ толщины покрывного слоя. 1 – однородный слой GaAs. 2 – 5 – КРС с КТ. Толщина покрывного слоя  $d_c$ , нм: 2 – 5, 3 – 20, 4 – 100, 5 – 300.

в слое КТ  $\Delta n_s$  по ширине петли гистерезиса  $\Delta V_{gh}$  и по фактору захвата при амплитудном значении напряжения на полевом электроде дают значения соответственно  $1 \times 10^{11}$  см<sup>-2</sup> и  $3 \times 10^{11}$  см<sup>-2</sup>. Они на порядок превышают поверхностную концентрацию КТ в структурах ( $\approx 3 \times 10^{10}$  см<sup>-2</sup>) по данным атомно-силовой микроскопии на вскрытых селективным травлением слоях КТ [7]. Это расхождение мы связываем с образованием вблизи слоя КТ атмосферы дефектов-ловушек для электронов. Одной из причин образования ловушек может быть наличие упругих напряжений на интерфейсе InAs/GaAs. Наличие подобных ловушек отмечалось в ряде работ и в частности в [9].

В разделе 4.4 рассматриваются температурные зависимости ДЭП и МЭП в КРС. На рис. 7 приведены температурные зависимости ширины петли гистерезиса для однородного слоя GaAs (кривая 1) и двух КРС с КТ с крайними значениями толщины покрывного слоя 20 и 300 нм (кривые 2, 3). При достаточно низких температурах (< 170 К) все зависимости сливаются практически в одну слабую температурную зависимость. Влияние квантово-размерного слоя на ширину петли гистерезиса при таких температурах не проявляется. При более высоких температурах наблюдается участок экспоненциального роста ширины петли гистерезиса вида:  $\Delta V_{gh} \sim \exp(-E_a/kT)$ , где  $E_a$  – энергия активации процесса, определяющего возникновение гистерезиса. Для структур с КТ этот участок начинается при более низких температурах ( $\approx 160$  К) и энергия активации имеет значение 0,16 эВ и 0,2 эВ при толщине покрывного слоя

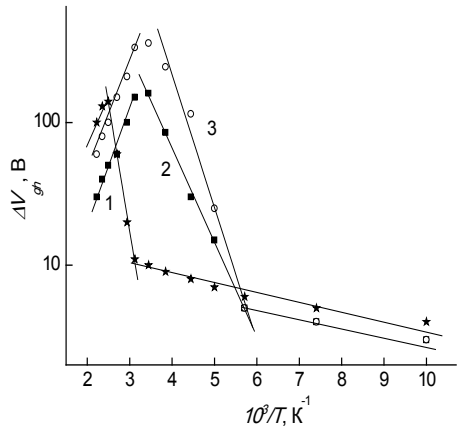


Рис. 7. Температурная зависимость ширины петли гистерезиса: 1 – для однородного слоя GaAs, для ГКТ с  $d_c$ : 2 – 20 нм, 3 – 300 нм.

20 и 300 нм соответственно (кривые 2, 3). Для однородного слоя GaAs экспоненциальный рост  $\Delta V_{gh}$  наблюдается при температурах выше 300 К и энергия активации составляет 0,6–0,7 эВ. Это значение близко к высоте поверхностного барьера на реальной поверхности n-GaAs. При достаточно высоких температурах в КРС происходит экспоненциальное уменьшение  $\Delta V_{gh}$  со значением  $E_a$ , близким к энергии активации на втором участке.

Температурная зависимость  $\Delta V_{gh}$  связана с температурной зависимостью времени релаксации эффекта поля, т.е. с частотной зависимостью  $\mu_F(f)$ . Повышение температуры измерения смещает область дисперсии  $\mu_F(f)$  к более высоким частотам (рис. 8). На рис. 8 пунктирной линией отмечена частота измерения ДЭП.

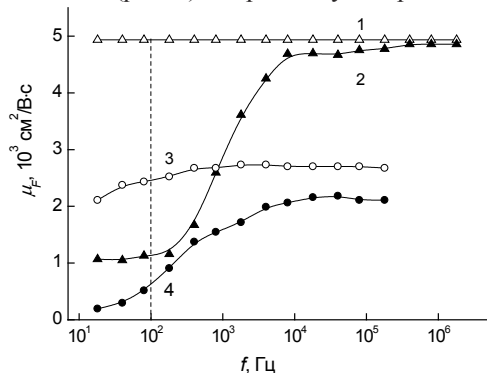


Рис. 8. Частотная зависимость  $\mu_F(f)$ : 1, 2 – для однородного слоя GaAs при 315 и 460 К соответственно; 3, 4 – для КРС с КТ с  $d_c = 300$  нм) при 230 и 297 К.

При комнатной температуре захват инжектированных носителей на поверхностные состояния в структуре с однородным слоем GaAs практически отсутствует (кривая 1) и гистерезис мал, но с ростом температуры область дисперсии сдвигается к более высоким частотам и при температуре 460 К захват на поверхностные состояния достигает максимального значения (кривая 2). Но при этом ширина петли гистерезиса начинает уменьшаться, так как реализуется условие  $f \ll 1/2\pi\tau$ .

В структурах с КТ область дисперсии, в которой происходит захват инжектированных носителей заряда в КТ, уже при комнатной температуре смещена к более высоким частотам (рис. 8, кривая 3) по сравнению с областью дисперсии для однородного слоя (кривая 1). Поэтому для наблюдения в структурах КТ активационного участка на зависимости  $\Delta V_{gh}(T)$  необходимо понижать температуру.

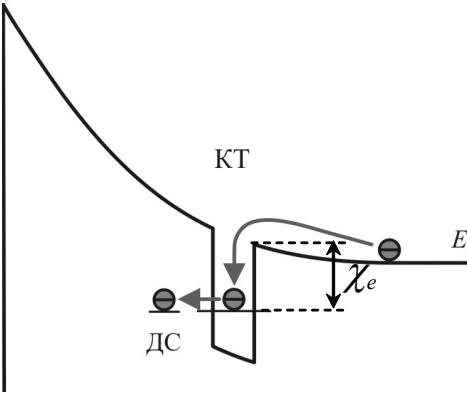
В разделе 4.5 обсуждаются возможные модели захвата носителей в слой КТ. Этот захват характеризуется следующими основными закономерностями:

1. Основной захват происходит на низких частотах ( $\sim 100$  Гц при 300 К) инжектирующего напряжения.
2. Центры захвата явно связаны со слоем КТ. Поверхностная концентрация захваченных в этот слой носителей зависит от толщины покровного слоя и при толщине 300 нм примерно на порядок превышает концентрацию КТ.
3. Концентрация захваченных носителей сильно зависит от толщины покровного слоя. При увеличении толщины от 5 до 300 нм концентрация захваченных носителей, определенная по ширине петли гистерезиса, увеличивается в 6 раз, а

по отношению к однородному слою GaAs – почти в 30 раз.

4. В некотором интервале температур ширина петли гистерезиса экспоненциально растет при повышении температуры с энергией активации 0,2 и 0,16 эВ при  $d_c = 300$  и 20 нм соответственно.

Проведенный анализ различных моделей захвата, подобных моделям захвата



на так называемые медленные поверхностные состояния [10], показал, что наиболее адекватно соответствует указанным выше закономерностям модель двухступенчатого захвата: инжектированные электроны сначала захватываются в основное состояние КТ и затем туннелируют на дефектные состояния вблизи интерфейса КТ/покровный слой (рис. 9). Эта модель объясняет низкочастотную дисперсию эффекта поля в МЭП и высокую концентрацию захваченных в слой КТ носителей, позволяет связать энергию активации ДЭП с высотой эмиссионного барьера в КТ ( $E_a = \chi_e$ ).

Рис. 9. Модель двухступенчатого захвата инжектированных в эффекте поля носителей в КРС с КТ с последующим туннельным переходом на дефектные состояния вблизи КТ.

В разделе 4.6 рассматривается ДЭП в КРС с одиночным слоем КЯ в ОПЗ (рис. 10). В отличие от кривых ДЭП в структурах с КТ, в КРС

слоем КЯ в ОПЗ (рис. 10). В отличие от с КЯ гистерезис ДЭП очень мал, а при  $d_c = 300$  нм (кривая 4), когда КЯ находится вблизи границы ОПЗ и КНО, он практически полностью исчезает и кривая ДЭП становится линейной. Наклону кривой 4 соответствует подвижность  $\mu_F \approx 1100$  см<sup>2</sup>/В×с, которая примерно в три раза меньше холловской подвижности электронов для данного образца. Поскольку энергетический спектр КЯ, в отличие от дискретного спектра КТ, квазинепрерывный, захват электронов в слой КТ не приводит к их локализации. При расположении КЯ на границе ОПЗ и КНО и отсутствии захвата на какие-либо ловушки в самой КЯ подвижность  $\mu_F$  должна определяться дрейфовой подвижностью основных носителей в КЯ  $\mu_D$ .

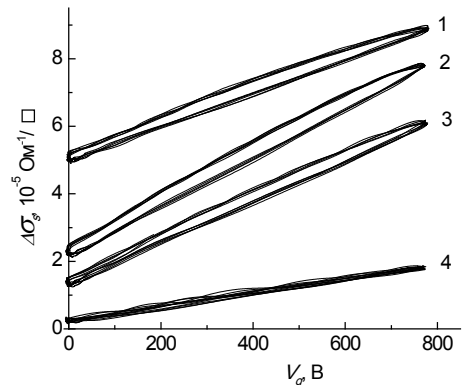


Рис. 10. ДЭП в КРС с КЯ. Толщина покровного слоя  $d_c$ , нм: 1 – 5, 2 – 20, 3 – 100, 4 – 300.

Таким образом, методика ДЭП открывает уникальную возможность измерения дрейфовой подвижности носителей в одиночных КЯ, встроенных на границе ОПЗ и КНО.

Раздел 4.7 посвящен изучению влияния на ДЭП встраивания дельта-слоев Mn в структуры с эпитаксиальными слоями GaAs и КРС с КЯ и КТ.

На всех структурах с дельта-слоем Mn наблюдается сильный захват инжектированных носителей, что проявляется в низких значениях подвижности основных носителей  $\mu_F \ll \mu_H$  и большой ширине петли гистерезиса  $\Delta V_{gh}$ , причем эти величины слабо зависят от наличия и типа квантово-размерного слоя (КТ, КЯ), а также от толщины спейсерного слоя между дельта-слоем Mn и слоем КЯ или КТ. Захват носителей в таких структурах определяется захватом на ловушки в самом дельта-слое Mn или дефектные состояния вблизи него.

**В заключении** сформулированы основные выводы работы:

1. На модельных КРС с разным типом и расположением квантово-размерных слоев (КЯ, КТ, КЯ/КТ) установлены особенности спектров ФПЭ и планарной ФП и их связь с энергетическим спектром КРС. Показано, что спектры планарной ФП могут существенно отличаться от спектров ФПЭ. Они более сложны в интерпретации в связи с необходимостью учета вклада в ФП барьерной ФП на поверхностном и внутреннем барьерах и объемной примесной ФП.

2. Методами спектроскопии ФП и ФПЭ обнаружено образование в GaAs при МОС-гидридной эпитаксии метастабильных дефектных центров с глубоким уровнем  $E_c - 0,65$  эВ, которые самопроизвольно распадаются при комнатной температуре с временем релаксации порядка 10-20 дней.

3. Показана возможность определения энергетического спектра квантово-размерных слоев, расположенных вблизи внутреннего барьера КРС на границе с полуизолирующей подложкой, с помощью спектроскопии КФЭ в системе ЭДП или МДП-структуре с полуизолирующей подложкой в качестве диэлектрика.

4. Показано, что сравнительное изучение спектров ФБШ и ФПЭ является эффективным методом обнаружения низкотемпературного образования дефектов с глубокими уровнями при нанесении химически активных металлов на КРС. С применением этой методики установлено, что нанесение ферромагнитного Со выпрямляющего контакта при  $100^\circ\text{C}$  приводит к образованию вблизи него собственного дефектного комплекса EL2. **В комбинированных слоях КЯ/КТ** квантовая яма эффективно защищает КТ от проникновения в них дефектов при поверхностном дефектообразовании.

5. Установлено сильное влияние встраивания  $\delta$ -слоя Mn на фоточувствительность в области поглощения КЯ или КТ, зависящее от толщины спейсерного слоя между ними. При толщине спейсера около 1 нм в КРС с КЯ и около 10 нм в КРС с КТ фоточувствительность от квантово-размерных слоев практически исчезает. Эффект подавления фоточувствительности связан с проникновением дефектов, генерированных встраиванием дельта-слоя Mn, в квантово-размерные слои,

которое приводит к увеличению скорости рекомбинации неравновесных носителей в них и, следовательно, к уменьшению эффективности их эмиссии из КЯ и КТ.

6. Развита новый метод исследования эффекта поля – динамический эффект поля, основанный на измерении нестационарного изменения квазиповерхностной проводимости под действием монополярного пульсирующего напряжения, инжектирующего основные носители в полупроводник. Метод позволяет определять дрейфовую подвижность носителей в одиночных КЯ, концентрацию центров захвата и высоту эмиссионного барьера в слоях КТ и некоторые другие параметры КРС.

7. ДЭП в однородных слоях **n- и p-GaAs характеризуется высоким значением** подвижности в эффекте поля, близким к значению холловской подвижности основных носителей, и малой шириной петли гистерезиса, отсутствует дисперсия подвижности в МЭП в диапазоне  $10 - 10^6$  Гц при комнатной температуре. Дисперсия МЭП при повышенных температурах описывается частотной зависимостью с одним временем релаксации, которое экспоненциально уменьшается при повышении температуры. Относительно слабый захват инжектированных носителей в темноте сильно увеличивается при освещении слоев. Закономерности эффекта поля в однородных слоях **GaAs описываются моделью захвата инжектированных носителей** через поверхностный барьер высотой  $0,5 - 0,6$  эВ на поверхностные состояния с квазинепрерывным распределением по энергии.

8. Встраивание слоя КТ InAs в поверхностный барьер GaAs приводит к уменьшению наклона кривой ДЭП и значительному уширению петли гистерезиса, смещению в область высоких частот и сильному уширению области дисперсии МЭП, что обусловлено захватом инжектированных носителей в слой КТ. Захват наиболее сильно проявляется, когда слой КТ встроен вблизи границы ОПЗ с квазинейтральной областью.

9. Определенная из ДЭП поверхностная концентрация захваченных электронов в слой КТ примерно на порядок превышает поверхностную концентрацию КТ, а энергия активации процесса захвата близка к высоте эмиссионного барьера в КТ ( $\approx 0,2$  эВ). В однородных слоях n-GaAs она близка к высоте поверхностного барьера ( $\approx 0,6$  эВ). Предложена модель двухступенчатого захвата инжектированных в эффекте поля электронов в слой КТ, согласно которой первичный захват на основной уровень размерного квантования в КТ сопровождается последующим туннельным переходом их на дефектные состояния вблизи КТ.

10. Показана возможность определения методом ДЭП дрейфовой подвижности электронов в одиночных КЯ, встроенных на границе ОПЗ с квазинейтральной областью. В исследованных КРС n-типа она примерно в три раза меньше подвижности электронов в квазинейтральной области.

11. Встраивание дельта-слоя **Mn в приповерхностную область** однородного слоя GaAs, в КРС с КЯ и КТ приводит к сильному захвату основных носителей на ловушки, связанные с дельта-слоем Mn. Концентрация захваченных на



ловушки носителей практически не зависит от наличия и типа квантово-размерного слоя (КЯ, КТ).

### Список цитированной литературы

- 1 Гетероструктуры с квантовыми точками: получение, свойства, лазеры / Н.Н. Леденцов [и др.] // ФТП. – 1998. Т. 32, вып. 4. – С. 385–410.
- 2 Bimberg, D. Quantum dot heterostructures / D. Bimberg, M. Grundmann, N.N. Ledentsov. // N.Y. USA : John Wiley & Sons. – 1999 – 338 p.
- 3 Sze, S.M. Evolution of Nonvolatile Semiconductor Memory: From Floating-Gate to Single-Electron Memory Cell / S.M. Sze // Future Trends in Microelectronics. John Wiley & Sons, Inc. – 1999 – P. 291–303.
- 4 Balocco, C. Room-temperature operations of memory devices based on self-assembled InAs quantum dot structures / C. Balocco, A.M. Song, M. Missous // Appl. Phys. Lett. – 2004 – Vol. 85, n. 24. – P. 5911 – 5913.
- 5 Matsukura, F. III-V Ferromagnetic Semiconductors / F. Matsukura, H. Ohno, T. Dietl // Handb. Magn. Mater. – 2002 – Vol. 14 – P. 1–87.
- 6 Montgomery, H.C. Field Effect in Germanium at High Frequencies / H.C. Montgomery // Phys. Rev. – 1957 – Vol. 106, n. 3 – P. 441–445.
- 7 Tuning the energy spectrum of the InAs/GaAs quantum dots structures by varying the thickness and composition of a thin double GaAs/InGaAs cladding layer / I. A. Karpovich [et al.] // Trends in nanotechnology research, Nova Science Publishers, Inc. – P. 197– 208.
- 8 Барьерная фотопроводимость в эпитаксиальных пленках GaAs и InP / И.А. Карпович [и др.] // ФТП. – 1989 – Т. 23, № 6. – С. 2164 – 2169.
- 9 Нестационарная спектроскопия глубоких уровней в лазерных структурах InAs/GaAs с вертикально связанными квантовыми точками / М.М. Соболев [и др.] // ФТП – 1997 – Т. 31, вып. 10 – С. 1249 – 1254.
- 10 Овсяк, В.Н. Электронные процессы в полупроводниках с областями пространственного заряда / В.Н. Овсяк. – СО. Новосибирск.: Наука, 1984 – 255 с.

### Основные публикации по теме диссертации, опубликованные в изданиях перечня ВАК

- A1. Влияние модификации покровного слоя на свойства водородочувствительных диодных гетероструктур с квантовой ямой Pd/GaAs/InGaAs / С.В. Тихов, И.А. Карпович, Ю.Ю. Гущина, Л.А. Истомина // ПЖТФ – 2007 – Т. 33, вып. 15 – С. 69 – 74.
- A2. Влияние квантово-размерных слоев In(Ga)As на эффект поля в слоях GaAs / И.А. Карпович, С.В. Тихов, Л.А. Истомина, О.Е. Хапугин // Вестник Нижегородского университета, серия физическая – 2008 – №1 – С. 25 – 29.
- A3. О применении фотоэлектрической спектроскопии для исследования энерге-

тического спектра квантово-размерных гетеронаноструктур InGaAs/GaAs, выращенных газофазной эпитаксией // Л.А. Истомин, И.А. Карпович, А.П. Горшков, Б.Н. Звонков, А.П. Павлов // Вестник Нижегородского университета, серия физическая – 2008 – № 4 – С. 43 – 48.

- A4. Горшков, А.П. Влияние встраивания дельта-слоя Mn на фотоэлектрические спектры гетеронаноструктур с квантовыми ямами и точками In(Ga)As/GaAs / А.П. Горшков, Л.А. Истомин, О.Е. Хапугин // Вестник Нижегородского университета, серия физическая – 2010 – № 5, ч. 2 – С.
- A5. Карпович, И.А. Динамический эффект поля в легированных дельта-слоем Mn гетеронаноструктурах с квантовой ямой и квантовыми точками In(Ga)As/GaAs // И.А. Карпович, Л.А. Истомин // Известия РАН. Серия физическая – 2011 – Т. 75, № 1 – С. 27 – 30.

#### **Публикации в сборниках тезисов конференций по теме диссертации**

- A6. Истомин, Л.А. Влияние модификации покровного слоя на фотоэлектронные спектры квантово-размерных диодных структур In(Ga)As/GaAs / Л.А. Истомин, И.А. Карпович, П.Б. Демина // Материалы nano-, микро-, и оптоэлектроники: физические свойства и применение. Сборник трудов 5-й межрегиональной молодежной научной школы, Саранск, 3-6 октября 2006 г. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2006 – С. 114.
- A7. Эффект поля в гетеронаноструктурах с квантовыми точками InAs/GaAs / И.А. Карпович, С.В. Тихов, Л.А. Истомин, А.В. Кутузов // Девятая конференция «Арсенид галлия и полупроводниковые соединения группы III-V» (3-5 октября 2006 г., Томск, Россия) «GaAs–2006»: Материалы конференции. – Томск: Томский госуниверситет, 2006 – С. 345 – 348.
- A8. Исследование процесса захвата неравновесных носителей в слое квантовых точек и ям In(Ga)As/GaAs методом нестационарного эффекта поля / И.А. Карпович, С.В. Тихов, Л.А. Истомин, О.Е. Хапугин, П.Н. Мишин // Тезисы докладов VIII Российской конференции по физике полупроводников. Екатеринбург, 30 сентября – 5 октября, 2007 г. – Екатеринбург: Институт физики металлов УрО РАН, 2007 – С. 263.
- A9. Истомин, Л.А. Эффект поля в квантово-размерных гетеронаноструктурах GaAs/In(Ga)As / Л.А. Истомин, И.А. Карпович, С.В. Тихов, О.Е. Хапугин, П.Н. Мишин // Материалы nano-, микро-, и оптоэлектроники: физические свойства и применение. Сборник трудов 6-й всероссийской молодежной научной школы. Саранск, 2-5 октября 2007 г. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2007 – С. 37.
- A10. Эффект поля в гетеронаноструктурах с квантовыми точками InAs/GaAs / Л.А. Истомин, И.А. Карпович, С.В. Тихов // Восьмая всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и полупроводни-

- ковой опто- и наноэлектронике. Тезисы докладов. 4-8 декабря 2006 г. С. Петербург. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2006 – С. 35.
- A11. Влияние нанесения ферромагнитных контактов (Co) на фотоэлектронные спектры квантово-размерных структур InGaAs/GaAs / И.А. Карпович, А.П. Павлов, Л.А. Истомина // XII Нижегородская сессия молодых ученых. Естественнонаучные дисциплины г. Нижний Новгород, 16 – 21 апреля 2007 г. – Н. Новгород: Изд-во «Издательский салон» ИП Гладкова О.В., 2007 – С. 67.
- A12. Влияние квантово-размерных слоев и создаваемых ими примесно-дефектных центров на эффект поля в гетеронаноструктурах In(Ga)As/GaAs / Л.А. Истомина, И.А. Карпович, С.В. Тихов, Б.Н. Звонков // Тезисы докладов XIII конференции «Высокочистые вещества и материалы. Получение, анализ, применение» Нижний Новгород, 28-31 мая 2007 года – Изд. Ю.А. Николаев, 2007 – С. 262– 263.
- A13. Истомина, Л.А. Динамический эффект поля в гетероструктурах с квантовыми точками InAs/GaAs / Л.А. Истомина, С.В. Тихов, И.А. Карпович // Девятая всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике 3-7 декабря 2007 г. С. Петербург – Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2007 –С. 39.
- A14. Карпович, И.А. Динамический эффект поля в гетероструктурах с квантовыми точками InAs/GaAs / И.А. Карпович, С.В. Тихов, Л.А. Истомина // Нанозифика и наноэлектроника XII Международный Симпозиум 10 – 14 марта 2008 г. – Н. Новгород: ИФМ РАН, 2008 – Т. 2, С. 319 – 320.
- A15. Павлов, А.П. Применение методов фотоэлектрической спектроскопии для исследования энергетического спектра гетеронаноструктур In(Ga)As/GaAs / А.П. Павлов, Л.А. Истомина, И.А. Карпович // XIII Нижегородская сессия молодых ученых. Естественнонаучные дисциплины г. Нижний Новгород, 20 – 25 апреля 2008 г. – Н. Новгород: Изд-во «Издательский салон» ИП Гладкова О.В., 2008 – С. 71.
- A16. Карпович, И.А. Влияние встраивания слоя квантовых точек InAs в приповерхностную область GaAs на характеристике барьеров Шоттки Au/GaAs // И.А. Карпович, С.В. Тихов, Л.А. Истомина // XXVII научные чтения имени академика Н.В. Белова. Тезисы докладов конференции 16 – 17 декабря 2008 г. – Н. Новгород: ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2008. – С. 125 – 127.
- A17. Истомина, Л.А. Динамический эффект поля в гетеронаноструктурах с квантовой ямой и квантовыми точками In(Ga)As/GaAs, легированных  $\delta$ -слоем Mn / Л.А. Истомина, И.А. Карпович // Нанозифика и наноэлектроника XIV Международный Симпозиум 15 – 19 марта 2010 г. – Н. Новгород: ИФМ РАН, 2010 – Т. 2, С. 553 – 554.

Подписано в печать 11.11.2010 г. Формат 60×84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Усл. п. л. 1. Заказ № 684. Тираж 100 экз.

Отпечатано с готового оригинал-макета  
В типографии Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского.  
603000, г. Н. Новгород, ул. Б. Покровская, 37