

На правах рукописи

Дорохин Михаил Владимирович

**ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ
ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ GaAs СТРУКТУР, СОДЕРЖАЩИХ
ФЕРРОМАГНИТНЫЕ СЛОИ**

01.04.10 – физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Нижний Новгород - 2007

Работа выполнена в Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник Данилов Юрий Александрович

Официальные оппоненты: член-корр. РАН, доктор физико-математических наук,
профессор Андронов Александр Александрович

доктор физико-математических наук
профессор Болдыревский Павел Борисович

Ведущая организация: Институт физики твёрдого тела РАН, г. Черноголовка

Защита состоится 10 октября 2007 г. 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, д.23, корп.3.

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

Автореферат разослан 07 сентября 2007 года.

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

А.И. Машин

Введение

Актуальность темы

Исследование эффектов спиновой ориентации и спиновой инжекции носителей заряда в твердотельных системах является одним из наиболее актуальных направлений опто- и наноэлектроники, получившим название «спинтроника» [1-3]. В последнее время большое внимание уделяется полупроводниковым структурам спинтроники, что обусловлено не только интересом к изучению фундаментальных свойств системы ориентированных по спину носителей, но и возможностью передачи информации с помощью спиновых состояний. Для реализации прикладного аспекта спинтроники научными группами из разных стран разрабатываются различные конструкции «спиновых транзисторов» и «спиновых светоизлучающих диодов» [1-3]. Спиновый светоизлучающий диод (ССИД) является одним из простейших, но в то же время одним из наиболее эффективных приборов спинтроники. В таком приборе информация передаётся при регистрации циркулярной поляризации электролюминесценции (ЭЛ), которая возникает в результате рекомбинации спин-поляризованных носителей заряда [2].

Существенные перспективы для применения в спинтронике имеют наноструктуры на основе GaAs, включающие ферромагнитный (ФМ) слой [3]. Полупроводниковые квантово-размерные гетероструктуры обладают уникальными свойствами и широко применяются во многих приборах, например, в светоизлучающих диодах и лазерах. Создание ферромагнитного эмиттера в светодиодной структуре значительно расширяет её функциональные возможности за счёт использования «спиновой» степени свободы носителей заряда. Наиболее распространёнными в настоящее время типами ФМ материалов, применяемых в ССИД, являются переходный металл (Fe, Ni, Co) и ферромагнитный полупроводник GaMnAs. Основной задачей, решаемой при создании ССИД, является обеспечение эффективной инжекции поляризованных по спину носителей в активную область диода. Решение

указанной задачи позволит реализовать прибор, работающий на принципах передачи спиновой информации.

В данной работе исследовались гетероструктуры с квантовыми ямами InGaAs/GaAs и с квантовыми точками InAs/GaAs, выращенные методом МОС-гидридной эпитаксии (МОСГЭ) при атмосферном давлении, содержащие ферромагнитные металлические (Ni, Co) или полупроводниковые (GaMnAs) слои.

Цель и основные задачи работы

Основной целью работы являлось изготовление и исследование светоизлучающих полупроводниковых квантово-размерных гетероструктур на основе GaAs с ферромагнитным эмиттерным контактом, а также изучение эффектов спиновой инжекции в указанных структурах, помещённых в магнитные поля, методом спектроскопии циркулярно-поляризованной электролюминесценции.

Используемый для изготовления структур метод МОС-гидридной эпитаксии отличается своей простотой и экономичностью, однако возможность его применения для изготовления структур спинтроники практически не изучена. Не рассмотрены в достаточной степени свойства светодиодов, не исследовано взаимное влияние ферромагнитных слоёв и активной области на работу приборов. В связи с этим были определены основные задачи исследования:

1. Разработка конструкции светоизлучающих диодов на основе гетеронаноструктур In(Ga)As/GaAs, содержащих ферромагнитные слои. Исследование влияния встроенного ферромагнитного слоя на процессы формирования указанных структур.
2. Установление зависимости люминесцентных и электрических свойств диодных структур от параметров ферромагнитных слоев. Определение оптимальных технологических параметров изготовления спинового светоизлучающего диода с высокой эффективностью электролюминесценции.

3. Исследование циркулярной поляризации электролюминесценции структур в магнитном поле. Определение эффективности спиновой инжекции из ФМ слоя в активную область диодов. Установление зависимости эффективности спиновой инжекции от таких параметров структур, как вид ФМ слоя, расстояние между ним и активной областью прибора.

Научная новизна работы

1. Впервые показана возможность эффективной спиновой инжекции дырок в прямосмещенных диодах Шоттки Ni(Co)/GaAs. Из экспериментов на образцах ССИД с различной глубиной залегания КЯ по отношению к границе раздела металл/GaAs определена эффективная длина (~ 80 нм) потери спиновой ориентации дырок в эпитаксиальном слое GaAs.

2. Впервые было установлено, что как эффективность спиновой инжекции из Ni(Co) контакта Шоттки, так и эффективность электролюминесценции, определяются свойствами границы раздела ФМ металл/GaAs, а наибольшая эффективность спиновой инжекции характерна для многослойного металлического контакта, содержащего тонкую промежуточную плёнку Au между ФМ металлом и полупроводником.

3. Отработана оригинальная комбинированная методика формирования ФМ слоёв GaMnAs для светоизлучающих структур, сочетающая МОСГЭ и лазерное распыление.

4. Впервые была исследована циркулярная поляризация ЭЛ структур, содержащих КЯ InGaAs/GaAs и δ <Mn>-слой, помещённые в область пространственного заряда барьера Шоттки Au/GaAs. Показано, что введение δ <Mn>-слоя способствует существенному повышению степени циркулярной поляризации ЭЛ от КЯ по сравнению с контрольными образцами.

Практическая ценность работы

1. В работе определены условия формирования диода Шоттки с ФМ эмиттером (толщины соответствующих слоёв, вид структуры и контактов), которые необходимы для получения высокой степени циркулярной поляризации ЭЛ. Отработанная технология изготовления может быть

использована при создании светодиодов, выполняющих одну из базовых функций спинтроники: кодирование информации с помощью спиновой ориентации.

2. Полученные результаты исследований могут быть положены в основу дальнейшего развития ССИД, направленного на исследование способов увеличения эффективности спиновой инжекции и повышение рабочих температур.

3. Применённый комбинированный способ изготовления светоизлучающих структур, содержащих слои GaMnAs, показывает принципиальную возможность формирования ССИД относительно недорогим и производительным методом МОС-гидридной эпитаксии.

4. Показана возможность применения δ <Mn>-легирования гетероструктур для создания спиновой ориентации дырок в КЯ.

На защиту выносятся следующие основные положения

1. В гетероструктурах с InGaAs/GaAs квантовой ямой и контактом Шоттки Ni(Co), нанесённым на реальную поверхность GaAs наблюдается эффективная спиновая инжекция дырок из ФМ контакта, которая обуславливает высокое значение степени циркулярной поляризации ($P_{ЭЛ} = 20-40\%$ при $B = 8.5$ Т) излучения. Наблюдаемые локальные минимумы на зависимости степени циркулярной поляризации ЭЛ от магнитного поля обусловлены изменением фактора заполнения уровней Ландау и осцилляциями экранирования неоднородностей потенциала в КЯ.

2. Использование трёхслойного эмиттера Au/переходный металл/Au, где верхний слой Au служит для предотвращения окисления ферромагнитного металла, а нижний – для замедления твердотельной реакции на границе раздела переходный металл/GaAs, позволяет повысить эффективность электролюминесценции, а также степень циркулярной поляризации ЭЛ светоизлучающего диода с барьером Шоттки.

3. Длина переноса спина **дырок** в нелегированном GaAs, определённая из измерений циркулярной поляризации ЭЛ на структурах с InGaAs/GaAs квантовыми ямами, составила 80 нм при 1.5 К.

4. Введение δ -Mn-легированного слоя в покровный GaAs на расстоянии 2-10 нм от квантовой ямы приводит к существенному повышению интенсивности электролюминесценции диодов Шоттки Au/GaAs/InGaAs и к увеличению (до 45 %) степени циркулярной поляризации излучения от квантовой ямы по сравнению с образцами без легирования марганцем. Возможный механизм повышения $P_{ЭЛ}$ состоит в увеличении степени спиновой поляризации дырок в КЯ, обусловленном их взаимодействием с близкорасположенными ионами Mn.

Личный вклад автора

Автором внесён определяющий вклад в получение основных экспериментальных результатов и доработку методики исследования циркулярной поляризации применительно к ЭЛ структур с КЯ InGaAs/GaAs. Исследования фото- и электролюминесценции проведены автором самостоятельно. Планирование экспериментов, обсуждение и анализ результатов проводились совместно с руководителем работы. Постановка ряда экспериментов и обсуждение их результатов проведены со с.н.с. НИФТИ ННГУ к.ф.-м.н. Е.А. Усковой (исследование характеристик барьеров Шоттки) и зав.лаб. ЛНЭП ИФТТ РАН д.ф.-м.н. В.Д. Кулаковским (исследования циркулярной поляризации электролюминесценции диодов). Измерения циркулярной поляризации электролюминесценции структур, помещённых в магнитное поле, проведены автором в Институте физики твёрдого тела РАН (г. Черноголовка) совместно с сотрудниками Лаборатории нелинейных электронных процессов к.ф.-м.н. С.В. Зайцевым, А.С. Бричкиным, к.ф.-м.н. А.В. Черненко. Методика измерений циркулярной поляризации ЭЛ доработана совместно с к.ф.-м.н. Н.В. Байдусем. Светоизлучающие структуры изготовлены при участии автора в группе эпитаксиальной технологии НИФТИ ННГУ вед.н.с., к.ф.-м.н. Б.Н. Звонковым (выращивание структур) и м.н.с. П.Б. Дёминой (нанесение металлических контактов).

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на IX, X и XI международных симпозиумах «Наноп физика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, 2005, 2006 и 2007 гг.); 13-м и 14-м и 15-м международных симпозиумах «Nanostructures: Science and technology» (С.-Петербург, 2005 и 2006 гг., Новосибирск 2007 г.), Международной научной конференции «Тонкие пленки и наноструктуры» (Москва, 2005 г.), XIII конференции «Высокочистые вещества и материалы. Получение, анализ, применение» (Нижний Новгород, 2007 г.), пятой, шестой, седьмой и восьмой всероссийских молодежных конференциях по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике (С.-Петербург, 2003, 2004, 2005 и 2006 гг.); X и XI Нижегородских сессиях молодых учёных (Нижний Новгород, 2005 и 2006 гг.), а также на семинарах физического факультета и НИФТИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского.

Публикации

По материалам диссертационной работы опубликовано 27 научных работ, включая 5 статей (из них 4 входят в перечень ВАК) и 22 публикаций в материалах конференций.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Общий объём диссертации составляет 1... страниц, включая 58 рисунков и 6 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 1... наименований, список работ автора по теме диссертации – 27 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В **первой главе** рассмотрены литературные данные, описывающие основные принципы инъекции носителей заряда, поляризованных по спину, из

ферромагнитного слоя в полупроводниковую структуру и способы их детектирования [2,4]. В число наиболее распространённых инжекторов можно включить ферромагнитные контакты Шоттки [3] и слои ферромагнитного полупроводника GaMnAs [2]. В обзоре отмечается, что в большинстве конструкций спиновых приборов из ферромагнитного слоя инжектируются поляризованные по спину электроны; инжекция спин-поляризованных дырок изучена весьма слабо. Практически не изучена и возможность спиновой поляризации двумерного дырочного газа за счёт введения δ <Mn>-слоя. Дельта-легирование перспективно ввиду возможности достижения высоких температур Кюри (~ 250 К) для разбавленного магнитного полупроводника на основе GaAs [5].

Во **второй главе** проводится обоснование выбора метода МОС-гидридной эпитаксии (МОСГЭ) при атмосферном давлении для изготовления светоизлучающих структур со спиновой инжекцией (спиновых светоизлучающих диодов), а также описываются используемые в работе методики измерений.

В разделе 2.1 проводится описание метода изготовления структур с помощью МОС-гидридной эпитаксии при атмосферном давлении. Достоинствами МОСГЭ являются высокая производительность и дешевизна, в то же время этот метод позволяет получать оптически совершенные структуры. Метод МОСГЭ давно и успешно применяется для изготовления светоизлучающих диодов и лазеров. Отмечены преимущества использования нового комбинированного метода изготовления структур, содержащих слои GaMnAs. Указанный метод сочетает в себе эпитаксиальное выращивание слоёв из металлоорганических соединений при сравнительно высокой температуре и нанесение материала путем лазерного распыления твердотельных мишеней в том же реакторе при пониженной температуре. В нашем случае это позволяет получить сравнительно резкие профили легирования марганцем и сохранить высокое оптическое качество светоизлучающих структур.

В разделе 2.2 описаны основные типы гетероструктур, исследуемых в настоящей работе.

Для осуществления спиновой инжекции большое значение имеет состояние границы раздела между ферромагнитным и немагнитным слоями, что было отмечено в литературном обзоре. Поэтому особое внимание в разделе 2.3 уделяется описанию методов изучения свойств структур для разных типов границы раздела. Исследования проводились с использованием методов фото-, электролюминесценции и измерения электрических характеристик в сочетании с методами атомно-силовой микроскопии, электронографии на отражение, спектроскопии фотоэдс, вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС) для определения кристаллического совершенства, фазового состава, установления механизмов люминесценции и токопереноса через границы раздела. Измерения фото- и электролюминесценции проводились при температурах 77 К и 300 К, измерения циркулярной поляризации электролюминесценции проводились при температуре 1.5 К.

В разделе 2.4 рассмотрена методика измерений ЭЛ. Определяющим моментом при получении экспериментальных результатов является выбор методики измерения циркулярной поляризации ЭЛ. Спиновая инжекция существенно зависит от направления магнитного поля по отношению к плоскости ФМ плёнки. В случае, когда вектор магнитной индукции лежит в плоскости плёнки, для перемагничивания последней не требуется высоких магнитных полей, однако эффективность преобразования спиновой поляризации носителей в циркулярную поляризацию ЭЛ в КЯ в этом случае незначительна [2]. Нами был выбран режим, в котором магнитное поле перпендикулярно плоскости КЯ. Для этого режима степень поляризации может принимать большие значения, но необходимы более высокие рабочие магнитные поля. Степень циркулярной поляризации электролюминесценции ($P_{ЭЛ}$) является важной экспериментальной характеристикой, позволяющей описывать спиновую ориентацию носителей; она определяется из соотношения:

$$P_{ЭЛ} = (I_+ - I_-)/(I_+ + I_-) \quad (1)$$

где $I_{\pm}(I)$ – интенсивности компонент с правой (левой) поляризацией спектров при выводе излучения в направлении магнитного поля [2].

В третьей главе приведены результаты исследований электролюминесценции квантово-размерных гетероструктур In(Ga)As/GaAs с КЯ или/и квантовыми точками (КТ) при прямом смещении барьера Шоттки

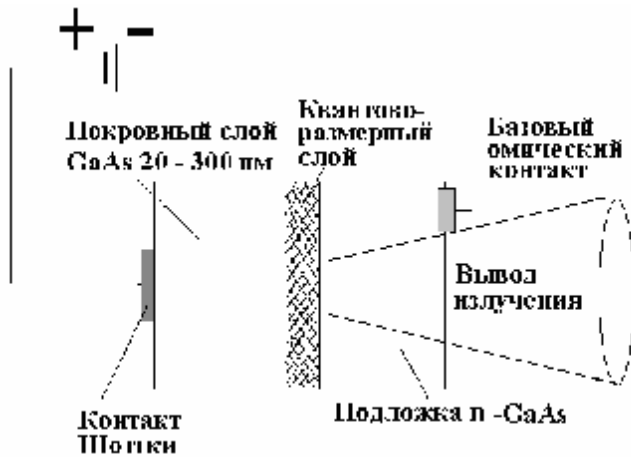


Рис.1. Схема образца для исследований ЭЛ.

Ni(Co,Au)-GaAs. На рис.1 показана схема образцов для исследований ЭЛ.

В разделе 3.1 приведены результаты исследований зависимости эффективности ЭЛ от вида контакта Шоттки. Впервые показано, что использование Ni или Co контактов Шоттки

сопровождается гашением ЭЛ по сравнению с аналогичными структурами с

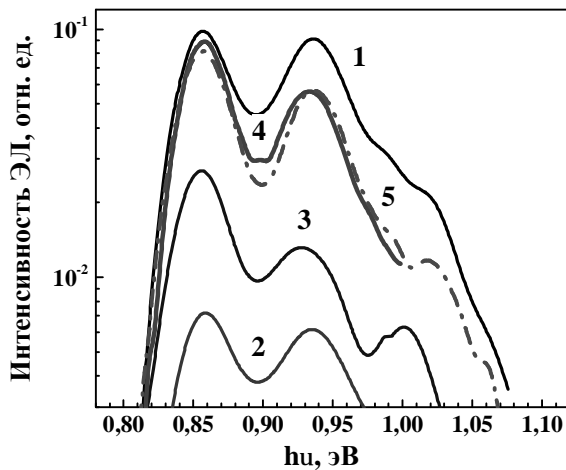


Рис.2. Спектры ЭЛ структур с КТ/КЯ. Кривые соответствуют контактам Шоттки: 1 – Au/GaAs, 2 – Ni/GaAs, 3 – Au-Ni/GaAs, 4 – Ni-Au/GaAs, 5 – Au-Ni-Au/GaAs

контрольным Au контактом (рис.2, кривые 1 и 2).

Гашение интенсивности ЭЛ структур с ФМ контактом обусловлено образованием в приповерхностной области GaAs центров безызлучательной рекомбинации. Сравнительный анализ

литературных данных и экспериментально полученных в настоящей работе профилей ВИМС, а также результатов электронографии дал

основание предположить, что эти центры появляются в результате взаимной диффузии атомов Ga, As и атомов переходного металла, которая сопровождается твердотельной реакцией. В отличие от атомов переходных металлов, золото менее интенсивно взаимодействует с GaAs. В связи с этим в

работе предложен способ защиты поверхности GaAs от взаимодействия с Ni или Co путём введения тонкой (< 30 нм) промежуточной прослойки Au. Из рис.2 (кривые 1, 2 и 4) видно, что встраивание плёнки Au между переходным металлом и GaAs позволяет повысить интенсивность ЭЛ до её уровня в структурах с контактом Au/GaAs. Наиболее эффективным оказалось применение трёхслойной металлизации, где кроме использования промежуточной плёнки (1-й слой) на поверхность Ni(Co) наносилась также защитная плёнка Au (3-й слой) для предотвращения окисления ФМ металла (рис.2, кривая 5). Для контакта Co/GaAs результаты влияния многослойной металлизации на ЭЛ аналогичны показанным на рис.2.

Проведённые измерения показывают, что излучательные и электрические свойства диодных структур определяются в основном нижним граничным металлом.

В разделе 3.2 описаны исследования поляризации электролюминесценции диодов Шоттки, проведённые на образцах, изученных в разделе 3.1. Получено, что электролюминесцентное излучение в магнитном поле циркулярно

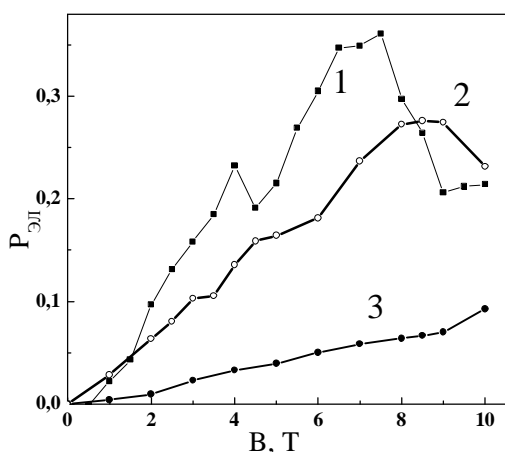


Рис.3. Зависимость степени циркулярной поляризации ЭЛ от величины магнитного поля для образца с контактом Au-Co-Au/GaAs (1), Ni/GaAs (2), Au/GaAs (3).

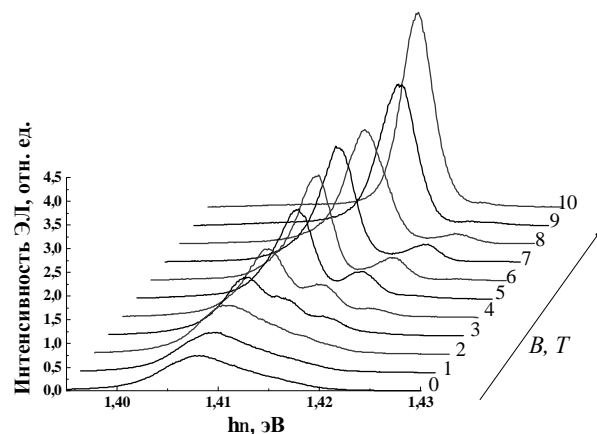


Рис.4. Спектры ЭЛ структуры с контактом Шоттки Au/Co/Au/GaAs в магнитных полях $B = 0 - 10$ Т, записанные в σ^+ поляризации.

поляризовано, причём степень поляризации, рассчитанная по формуле (1) для структур с ФМ контактом, значительно превышает таковую для структур с Au контактом (рис.3, кривые 1, 2 и 3), что свидетельствует о наличии спиновой

инжекции дырок из ФМ металла в полупроводник. Были обнаружены особенности спектра ЭЛ, заключающиеся в том, что в сильных магнитных полях линия люминесценции от КЯ расщепляется на серию пиков, связанных с переходами между различными уровнями Ландау (рис.4). С увеличением магнитного поля энергия уровней Ландау и число разрешенных состояний на этих уровнях увеличиваются, а количество заполненных уровней при фиксированной концентрации носителей уменьшается [6]. При этом в полях 4 – 5 Т и 9 - 10 Т из спектра ЭЛ пропадают пики, соответствующие переходам с третьего и второго уровней Ландау, соответственно (рис.4). Это свидетельствует об опустошении уровня Ландау по мере того, как его энергия становится выше энергии Ферми [6]. Опустошение уровня сопровождается уменьшением степени циркулярной поляризации ЭЛ. При тех же значениях магнитного поля на зависимости $P_{ЭЛ}(B)$ наблюдаются (рис.3) локальные минимумы (4 - 5 Т и 9 - 10 Т), которые, на наш взгляд, связаны с увеличением спинового рассеяния дырок в КЯ на неоднородностях потенциала. При опустошении состояний, соответствующих очередному уровню Ландау, носители, находившиеся на этих состояниях, не участвуют в экранировании неоднородностей потенциала в КЯ, что приводит к экспериментально наблюдаемому уширению линии ЭЛ и повышению спинового рассеяния дырок. В магнитных полях 7 – 8 Т, для которых рассеяние спинов дырок на неоднородностях потенциала и потеря спина в КЯ минимальны, степень циркулярной поляризации излучения максимальна.

В разделе 3.3 приводятся результаты исследования влияния вида ФМ контакта на степень циркулярной поляризации излучения из КЯ. Обнаружено, что наибольшее значение $P_{ЭЛ}$ (~ 40 %) характерно для диодов Шоттки с трёхслойным контактом Au/Ni/Au или Au/Co/Au. Для диодов с однослойным Ni или Co контактом максимальное значение $P_{ЭЛ}$ составляет 30 и 20 % соответственно.

Важный вывод этого раздела заключается в том, что в случае ФМ контактов структурам с низкой интенсивностью ЭЛ соответствует низкая

степень циркулярной поляризации (табл.1). Из этого следует, что дефекты в приповерхностной области GaAs, образованные при нанесении ФМ металла,

Таблица 1. Максимальные значения интенсивностей ЭЛ и $P_{ЭЛ}$ для разных контактов

Металл	$P_{ЭЛ\text{МАКС}}$, %	$I_{ЭЛ}$, отн.ед.
Au	12	1.00
Ni	30	0.20
Co	20	0.16
Au/Ni/Au	42	1.00
Au/Co/Au	42	0.98

помимо гашения ЭЛ, одновременно вызывают спиновое рассеяние носителей, инжектируемых из ФМ металла.

В разделе 3.4 изложены результаты исследования зависимости эффективности спиновой инжекции от толщины

покровного слоя GaAs над квантовой ямой InGaAs для диодов с трёхслойным Au/Ni/Au контактом. В первом приближении для учета зеемановского расщепления уровней в качестве значения $P_{МАХ}$ была выбрана разность двух значений циркулярной поляризации: структуры с ФМ контактом и аналогичной структуры с Au контактом ($P_{МАХ} = P_{ЭЛ}(\text{ФМ}) - P_{ЭЛ}(\text{Au})$).

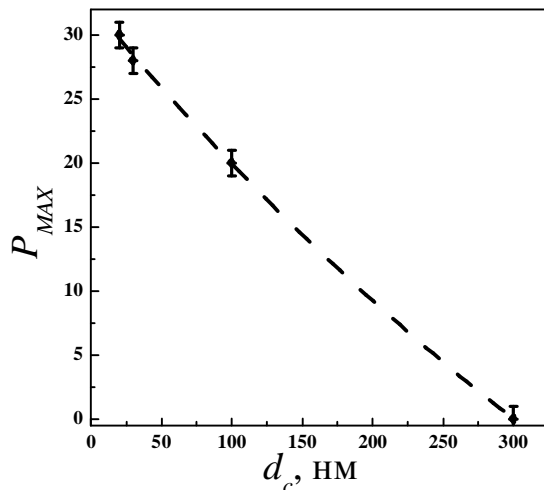


Рис.5. Зависимость степени циркулярной поляризации ЭЛ диодов с контактом Шоттки Au-Ni-Au/GaAs от толщины покровного слоя.

Показано, что с ростом толщины покровного слоя (d_c) степень циркулярной поляризации уменьшается (рис.5), что обусловлено увеличением спинового рассеяния при увеличении расстояния, проходимого дырками до КЯ. Для квантовой ямы, находящейся на расстоянии 300 нм от поверхности, значения $P_{ЭЛ}$ структуры с Au/Ni/Au и Au контактами совпадают, что свидетельствует о практически полной

потере спиновой поляризации дырок при транспорте на это расстояние. Полученная зависимость $P_{МАХ}(d_c)$ хорошо описывается спадающей экспоненциальной кривой. Отсюда было оценено значение длины спинового переноса l_s в нелегированном эпитаксиальном покровном слое GaAs, которое составило ≈ 80 нм. Следует отметить, что данное значение l_s сравнительно

велико, что показывает возможность применения метода МОС-гидридной эпитаксии для изготовления ССИД с инъекцией спин-поляризованных дырок.

В четвёртой главе показаны результаты исследования электролюминесценции светоизлучающих GaAs структур, содержащих слой ферромагнитного полупроводника GaMnAs.

В разделе 4.1 приведены результаты исследования свойств светоизлучающих диодов, содержащих слой GaMnAs, выращенные методом МОС-гидридной эпитаксии. Принципиальным отличием указанных диодов от изученных в главе 3 является введение КЯ и КТ в область p - n перехода, в котором в качестве p -области используется GaMnAs. Показано, что при температурах выращивания ($550 - 600^\circ\text{C}$) имеет место диффузия Mn в активную область светоизлучающей структуры. Это обуславливает уширение пика электролюминесценции КЯ. При изготовлении структуры с квантовыми точками InAs/GaAs выращивание слоя GaMnAs приводит к диффузионному перемешиванию материала квантовых точек и матрицы GaAs.

Кроме того, вместо КТ в активной области формируется слой InGaAs, с характерными свойствами квантовой ямы, а на спектрах фото- и

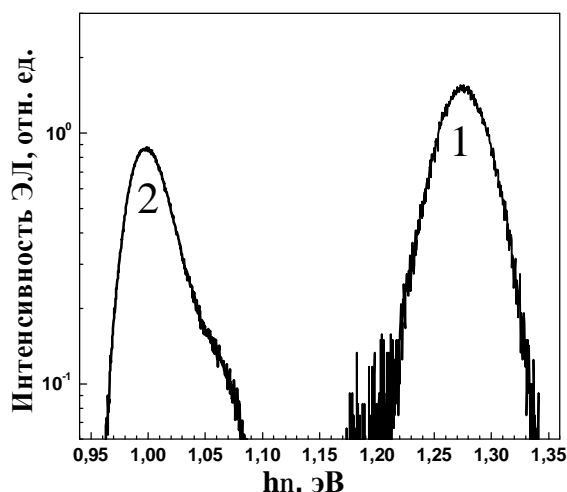


Рис.6. Спектры ЭЛ КРС с КТ, зарощенными слоем GaMnAs при высокой (550°C) – кривая 1 – и низкой температурах (380°C) – кривая 2.

электролюминесценции наблюдается пик при энергии ~ 1.29 эВ, который обычно ассоциируется с излучательной рекомбинацией в КЯ (рис.6, кривая 1).

Исследования показали, что для структур, изготовленных комбинированным методом, характерна сравнительно высокая интенсивность ЭЛ, в то же время (ввиду низкой температуры роста) практически не происходит диффузионного

проникновения Mn в активную область структур. В частности, на спектре ЭЛ диода с InAs/GaAs КТ наблюдается пик при энергии ~ 0.98 эВ,

соответствующий переходам с участием основного состояния КТ (рис.6, кривая 2).

В разделе 4.3 приводятся результаты исследования электролюминесценции и циркулярной поляризации ЭЛ, впервые полученные для наноструктур с барьером Шоттки Au/GaAs, содержащих КЯ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ и $\delta\langle\text{Mn}\rangle$ -слой в области пространственного заряда. Толщина спейсера между КЯ и δ -слоем варьировалась от 2 до 10 нм. Выбор структур с $\delta\langle\text{Mn}\rangle$ -легированием обусловлен их преимуществами по сравнению с объёмными слоями GaMnAs, к числу которых относятся возможность повышения температуры Кюри, а также простота изготовления и конструкции. Структуры с $\delta\langle\text{Mn}\rangle$ -слоем, изготовленные комбинированным методом, демонстрируют повышение интенсивности ЭЛ на порядок величины по сравнению с контрольными образцами без $\delta\langle\text{Mn}\rangle$ -слоя.

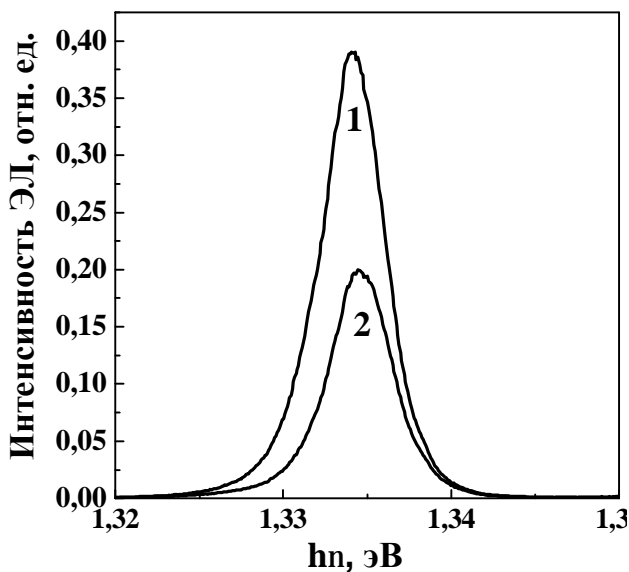


Рис.7. Спектры ЭЛ структуры с КЯ ($x = 0.2$) и $\delta\langle\text{Mn}\rangle$ -слоем, разделёнными спейсером. Кривая 1 соответствует σ^+ поляризации, кривая 2 – σ^- поляризации.

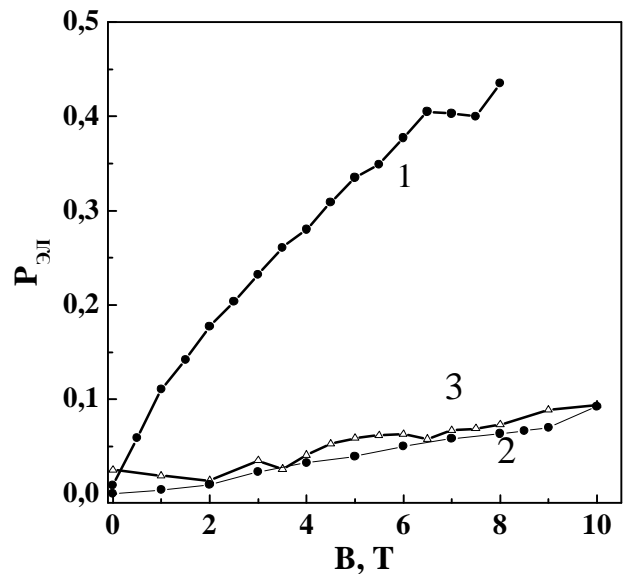


Рис.8. Зависимость $P_{эл}$ от магнитного поля для перехода в КЯ. Структуры: 1 – с КЯ и $\delta\langle\text{Mn}\rangle$ -слоем, разделёнными 3 нм слоем GaAs, 2 – контрольный образец без δ -легирования, 3 – образец с КЯ и $\delta\langle\text{Be}\rangle$ -слоем со спейсером 3 нм.

Излучение от КЯ в магнитном поле поляризовано циркулярно, причём $P_{эл}$ существенно зависит от толщины спейсерного слоя между $\delta\langle\text{Mn}\rangle$ и КЯ, а также от параметров самой квантовой ямы. Степень поляризации достигает

наибольшего значения $\approx 48\%$ в случае 3 нм спейсерного слоя между $\delta\langle\text{Mn}\rangle$ -слоем и квантовой ямой с содержанием $\text{In } x \approx 0.2$ (рис.8). Следует отметить, что для всех структур, содержащих $\delta\langle\text{Mn}\rangle$ -слой, значение $P_{\text{ЭЛ}}$ выше, чем для контрольных структур без δ -легирования или с $\delta\langle\text{Be}\rangle$ -слоем (рис.8), что позволяет сделать однозначный вывод о значительном влиянии δ -слоя марганца на спиновую поляризацию дырок в КЯ. Последняя, очевидно, возникает в результате взаимодействия дырок в квантовой яме с ионами марганца. Эффективность взаимодействия зависит от расстояния между $\delta\langle\text{Mn}\rangle$ -слоем и КЯ, а также от содержания In в квантовой яме.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации:

1. Найдено, что интенсивность электролюминесценции квантово-размерных структур с барьером Шоттки $\text{Ni}(\text{Co})/\text{GaAs}$ ниже (в 5 раз), чем в контрольных структурах с Au контактом. Снижение интенсивности ЭЛ обусловлено образованием центров безызлучательной рекомбинации вследствие твердотельной реакции переходного металла и GaAs на границе раздела.
2. Показано, что введение дополнительных Au слоёв в металлический контакт позволяет управлять эффективностью ЭЛ и степенью циркулярной поляризации ЭЛ структур $\text{GaAs}/\text{InGaAs}/\text{GaAs}$.
3. С учётом особенностей исследованных диодных структур доработана методика исследования циркулярной поляризации электролюминесценции. Показана возможность наблюдения эффективной спиновой инжекции дырок в структурах с квантовой ямой при прямом смещении барьера Шоттки $\text{Ni}(\text{Co})/n\text{-GaAs}$. В структурах с ФМ контактом степень циркулярной поляризации ЭЛ имеет сравнительно высокое значение (20 - 40 %). В контрольных образцах с немагнитным Au контактом циркулярная поляризация ЭЛ (до 10 % при 10 Т) обусловлена зеемановским расщеплением уровней в КЯ.
4. В исследуемых образцах с барьером Шоттки впервые обнаружены немонотонности в зависимости степени циркулярной поляризации электролюминесценции от магнитного поля, что связано с осцилляциями в экранировании неоднородностей потенциала в КЯ. Показано, что минимумы

наблюдаются при целочисленных факторах заполнения уровней Ландау, когда носители в КЯ не участвуют в экранировании. Такая ситуация сопровождается увеличением спинового рассеяния и уширением линий люминесценции.

5. В структурах с трёхслойным контактом Au/Ni/Au к GaAs определена зависимость степени циркулярной поляризации от глубины залегания КЯ. Зависимость $P_{ЭЛ}$ от толщины покровного слоя описывается спадающей экспоненциальной кривой, что обусловлено релаксацией спина дырок при переносе из ФМ контакта к квантовой яме. Оцененная по спаду аппроксимирующей кривой длина переноса спина дырки составляет 80 нм.

6. Установлено, что высокотемпературное выращивание ФМ слоя GaMnAs из металлоорганических соединений (500-600°C) сопровождается диффузией атомов Mn в соседние области GaAs, что приводит к уширению линии ЭЛ КЯ и к подавлению образования квантовых точек InAs/GaAs.

7. Применение нового комбинированного метода выращивания светоизлучающих структур с использованием МОСГЭ для формирования активной области и лазерного распыления мишени в этом же реакторе для нанесения слоёв ФМ полупроводника позволяет понизить температуру процесса до 300-400°C и тем самым минимизировать диффузию Mn в активную область диода.

8. Показано, что применение комбинированного метода выращивания позволяет проводить δ -легирование GaAs атомами Mn. Для структур с барьером Шоттки и δ <Mn>-слоем характерна более высокая эффективность электролюминесценции, чем для структур без δ -легирования.

9. Установлено, что введение δ <Mn>-слоя позволяет существенно повысить степень циркулярной поляризации ЭЛ (до 40 - 45 %) по сравнению со структурами без δ -легирования и со структурами с δ <Be>-слоем (~ 10 % в обоих случаях). Степень поляризации пика излучения КЯ зависит от толщины спейсерного GaAs между δ <Mn>-слоем и КЯ, а также от содержания In в квантовой яме. Объяснение указанных эффектов предполагает определяющее

влияние обменного взаимодействия между ионами Mn и дырками на спиновую поляризацию последних в квантовой яме.

Список цитированной литературы

- [1] Semiconductor Spintronics and Quantum Computation / Ed. by D.D. Awschalom, D. Loss, N. Samarth. - Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2002. - 311 p.
- [2] Žutic, I. Spintronics: Fundamentals and applications / I. Žutic, J. Fabian, S. Das Sarma // Rev. Mod. Phys. - 2004. - V.76. - P.323-410.
- [3] Concepts in Spin Electronics / Ed. by S. Maekawa. - New York: Oxford University Press, 2006. - 398 p.
- [4] Оптическая ориентация // под. ред. Б.П. Захарчени, Ф. Майера. Ленинград: Наука. - 1989. - 408 С.
- [5] High Temperature Ferromagnetism in GaAs-Based Heterostructures with Mn δ Doping / A.M. Nazmul, T. Amemiya, Y. Shuto, S. Sugahara, M. Tanaka // Phys. Rev. Lett. - 2005. - V.95. - P.017201.
- [6] Кукушкин, И.В. Плотность состояний двумерных электронов / И.В. Кукушкин, С.В. Мешков, В.Б. Тимофеев // УФН. - 1988. - Т.155, в.2. - С.219-264.

Основные публикации по теме диссертации

- A1. Влияние промежуточного окисного слоя в гетероструктурах металл - квантово-размерный полупроводник In(Ga)As/GaAs на эффективность электролюминесценции / Н.В. Байдусь, П.Б. Демина, М.В. Дорохин, Б.Н. Звонков, Е.И. Малышева, Е.А. Ускова. // ФТП. - 2005.- т. 39, в.1. - с.25-30.
- A2. Исследование свойств границы раздела Ni (Co)/GaAs в светоизлучающих диодах на основе квантово-размерных гетероструктур In(Ga)As/GaAs / Е.А. Ускова, М.В. Дорохин, Б.Н. Звонков, П.Б. Демина, Е.И. Малышева, Е.А. Питиримова, Ф.З. Гильмутдинов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2006. - В. 2. - С. 89-95.
- A3. Циркулярно-поляризованная электролюминесценция квантово-размерных гетероструктур InGaAs/GaAs с контактом Шоттки «ферромагнитный металл/GaAs» / М.В. Дорохин, С.В. Зайцев, В.Д. Кулаковский, Н.В. Байдусь, Ю.А. Данилов, П.Б. Демина, Б.Н. Звонков, Е.А. Ускова // Письма в ЖТФ. - 2006. - Т. 32, в. 24. - С. 46-52.
- A4. Electrical spin injection in forward biased Schottky diodes based on InGaAs-GaAs quantum well heterostructures / N.V. Baidus, M.I. Vasilevskiy, M.J.M. Gomes, M.V. Dorokhin, P.B. Demina, E.A. Uskova, B.N. Zvonkov, V.D. Kulakovskii, A.S. Brichkin, A.V. Chernenko, S.V. Zaitsev // Appl. Phys. Lett. - 2006. - V. 89, n. 18. - P. 181118.
- A5. Formation of magnetic GaAs:Mn layers for InGaAs/GaAs light emitting quantum-size structures / M.V. Dorokhin, B.N. Zvonkov, Yu.A. Danilov, V.V. Podolskii, P.B. Demina, O.V. Vikhrova, E.I. Malysheva // Int. J. Nanoscience. - 2007. - V. 6, n. 3. - P. 1-4.
- A6. Байдусь, Н.В. Электролюминесценция квантово-размерных гетероструктур InAs/GaAs с барьером Шоттки / Н.В. Байдусь, М.В. Дорохин // Пятая всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике, Санкт – Петербург, 1 – 6 декабря 2003 г. – Санкт-Петербург: 2003. - с.87.
- A7. Влияние границы раздела переходный металл/GaAs на электрические и люминесцентные свойства квантово-размерных гетероструктур InAs/GaAs / М.В. Дорохин, П.Б. Демина, Е.И. Малышева, Ю.А. Данилов // Шестая всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике. Тезисы докладов, Санкт – Петербург, 6 – 10 декабря 2004 г. – Санкт – Петербург: Политехн. ун-т, 2004. - С.38.

- A8. Электролюминесценция квантово-размерных гетероструктур с барьером Шоттки Ni(Co,Fe)/GaAs/InAs/GaAs / Е.А. Ускова, М.В. Дорохин, П.Б. Дёмина, Б.Н. Звонков, Е.И. Малышева, Ф.З. Гильмутдинов, Е.А. Питиримова // Нанозифика и наноэлектроника. Материалы Симпозиума, Нижний Новгород, 25-29 марта 2005 г. - Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2005. - С. 318-319.
- A9. Дорохин, М.В. Использование магнитных слоёв GaAs:Mn в светоизлучающих квантово-размерных гетероструктурах In(Ga)As/GaAs / М.В. Дорохин, Ю.А. Данилов // Тезисы Докладов X Нижегородской сессии молодых ученых. Естественнонаучные дисциплины, Нижний Новгород, 17-22 апреля 2005 г. – Нижний Новгород: 2005. - С.22.
- A10. Formation of magnetic GaAs:Mn layers for InGaAs/GaAs light emitting quantum-size structures / M.V. Dorokhin, B.N. Zvonkov, Yu.A. Danilov, V.V. Podolskii, P.B. Demina, O.V. Vikhrova // Nanostructures: physics and technology. 13th International Symposium, Proceedings, St Petersburg, Russia, June 20-25, 2005. - St Petersburg: Ioffe Institute, 2005. - P. 314-315.
- A11. Дорохин, М.В. Исследование свойств границы раздела переходный металл-полупроводник в излучающих квантово-размерных гетероструктурах In(Ga)As/GaAs с барьером Шоттки / М.В. Дорохин, П.Б. Демина, Ю.А. Данилов // Седьмая всероссийская молодежная конференции по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике, Тезисы докладов, Санкт - Петербург, 5 –9 декабря 2005 г. – Санкт-Петербург: Политехн.ун-т, 2005. - С.52.
- A12. Особенности инжекционной электролюминесценции квантово-размерных гетероструктур In(Ga)As/GaAs с многослойным контактом Шоттки, содержащим слой переходного металла / М.В. Дорохин, П.Б. Дёмина, Е.А. Ускова, Н.В. Байдусь, Б.Н. Звонков // Материалы Международной научной конференции «Тонкие пленки и наноструктуры», Москва, 22 – 26 ноября 2005 г. – Москва: 2005. - С. 201- 204.
- A13. Electrical spin injection in forward biased Schottky diodes based on ferromagnetic metal /InGaAs /GaAs QW heterostructures / N.V. Baidus, M.J.M. Gomes, M.I. Vasilevskiy, M.V. Dorokhin, P.B. Demina, E.A. Uskova, B.N. Zvonkov, V.D. Kulakovskiy, A.S. Brichkin, A.V. Chernenko, S.V. Zaitsev // Workshop on Low-Dimensional Semiconductor Structures: Growth, Properties and Applications, Aveiro, Portugal, January 27-28, 2006. – Aveiro: University of Aveiro, 2006. - P. 43.
- A14. Циркулярно-поляризованная электролюминесценция в диодах Шоттки Co/GaAs на основе гетероструктур с квантовой ямой / М.В. Дорохин, Ю.А. Данилов, П.Б. Дёмина, Е.А. Ускова // XI Нижегородская сессия молодых ученых. Естественнонаучные дисциплины, Нижний Новгород 16-21 апреля 2006 г. Нижний Новгород: 2006. - С.12-13.
- A15. Применение ферромагнитных слоёв в излучающих квантово-размерных гетероструктурах In(Ga)As/GaAs / М.В. Дорохин, П.Б. Дёмина, Ю.А. Данилов, В.Д. Кулаковский // Физика и химия высокоэнергетических систем. Сборник материалов II всероссийской конференции молодых учёных, Томск, 4 – 6 мая 2006 г. – Томск: Томский гос. ун-т, 2006. - С. 396-399.
- A16. GaAs-based quantum-size structures, doped by Mn / Yu.A. Danilov, M.J.S.P. Brasil, M.V. Dorokhin, Yu.N. Drozdov, A.L. Gazoto, F. Iikawa, M.V. Sapozhnikov, O.V. Vikhrova, B.N. Zvonkov // III Joint European Magnetic Symposia. Book of abstracts and programme, San Sebastian, 26 – 30 June, 2006. - 2006. - P.108.
- A17. Circularly polarized electroluminescence from InGaAs/GaAs quantum well heterostructures with ferromagnetic Schottky contact / M.V. Dorokhin, V.D. Kulakovskii, S.V. Zaitsev, V.Ya. Aleshkin, N.V. Baidus', Yu.A. Danilov, P.B. Demina, E.A. Uskova, B.N. Zvonkov // Nanostructures: physics and technology, 14th International Symposium, Proceedings, St. Petersburg, Russia, June 26-30, 2006. – St Petersburg: Ioffe Institute, 2006. - P. 51-52.
- A18. Electrical spin injection in light emitting Schottky diodes based on InGaAs /GaAs QW heterostructures / N.V. Baidus, M.I. Vasilevskiy, M.J.M. Gomes, V.D. Kulakovskii, S.V. Zaitsev, M.V. Dorokhin, P.B. Demina, E.A. Uskova and B.N. Zvonkov // 28th International

- conference on the Physics of Semiconductors, Proc., Vienna, Austria, July 24-28, 2006. - 2006 - P. 143.
- A19. Свойства ферромагнитных контактов Шоттки в гетероструктурах с квантовыми ямами / М.В. Дорохин, Е.А. Ускова, П.Б. Дёмина, Б.Н. Звонков // Материалы международной научной конференции «75 лет высшему образованию в Удмуртии», Ижевск, 2006. - 2006. - С. 50.
- A20. Получение слоев магнитных полупроводников типа $(A^3, Mn)B^5$ для приборов спинтроники / О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, М.В. Дорохин, Б.Н. Звонков, А.В. Кудрин // Конференция «Нанотехнологии – производству – 2006». Тезисы докладов, 29 ноября – 30 ноября 2006 г. – Фрязино: 2006. - С. 57-58.
- A21. Влияние свойств границы Ni(Co)/GaAs на эффективность спиновой инжекции в структурах с квантовой ямой InGaAs/GaAs / М.В. Дорохин, П.Б. Демина, М.М. Прокофьева, Ю.А. Данилов // Восьмая всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике. Тезисы докладов, Санкт-Петербург, 4-8 декабря 2006 г. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехн.ун-та, 2006. - С. 19.
- A22. Электролюминесценция квантово-размерных гетероструктур InGaAs/GaAs, содержащих слои GaAs δ -легированные атомами Mn / М.В. Дорохин, П.Б. Демина, М.М. Прокофьева, Ю.А. Данилов // Восьмая всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике. Тезисы докладов, Санкт-Петербург, 4-8 декабря 2006 г. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехн.ун-та, 2006. - С. 39.
- A.23. Прокофьева, М.М. Влияние тонкого промежуточного слоя AlAs на электролюминесценцию квантово-размерных гетероструктур InGaAs/GaAs с контактом Шоттки Ni/GaAs / М.М. Прокофьева, М.В. Дорохин, Ю.А. Данилов // Восьмая всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике. Тезисы докладов, Санкт-Петербург, 4-8 декабря 2006 г. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехн.ун-та, 2006. - С. 63.
- A24. Исследование эффектов спиновой инжекции носителей заряда из ферромагнитного контакта Шоттки Ni(Co)/GaAs в гетероструктурах с квантовой ямой / М.В. Дорохин, С.В. Зайцев, Н.В. Байдусь, Ю.А. Данилов, П.Б. Демина, Б.Н. Звонков, В.Д. Кулаковский, Е.А. Ускова // Нанопизика и наноэлектроника. XI Международный Симпозиум, Нижний Новгород, 10-14 марта 2007 г. – Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2007. - Т.1. - С. 214-215.
- A25. Создание методом МОС-гидридной эпитаксии квантово-размерных гетероструктур InGaAs/GaAs для исследования эффектов спиновой инжекции / М.В. Дорохин, С.В. Зайцев, О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, П.Б. Дёмина, Б.Н. Звонков // XIII конференция «Высококачественные вещества и материалы. Получение, анализ, применение», 28-31 мая 2007 г., Нижний Новгород. Тезисы докладов. - 2007. - С.249-250.
- A26. Spin injection and depolarization mechanisms in ferromagnetic Schottky diodes / S.V. Zaitsev, M.V. Dorokhin, V.D. Kulakovskii, P.B. Demina, N.V. Baidus', E.A. Uskova, B.N. Zvonkov // Nanostructures: physics and technology, 15th International Symposium, Proceedings, Novosibirsk, Russia, June 25-29, 2007. – Ioffe Institute, 2007. - P. 283-284.
- A27. Magnetic semiconductor (III,Mn)V emitters in circularly polarized light diodes / Yu.A. Danilov, P.B. Demina, M.V. Dorokhin, V.D. Kulakovskii, O.V. Vikhrova, S.V. Zaitsev, B.N. Zvonkov // Euro-Asian Symposium “Magnetism on a nanoscale”. Abstract Book. Kazan, 23-26 August 2007. P. 121.