

На правах рукописи

Дорохин Михаил Владимирович

**СПИН-ЗАВИСИМЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ЦИРКУЛЯРНО-ПОЛЯРИЗОВАННАЯ  
ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ В ГИБРИДНЫХ СТРУКТУРАХ  
ФЕРРОМАГНЕТИК/ПОЛУПРОВОДНИК АЗВ5**

Специальность 01.04.10 – физика полупроводников

**АВТОРЕФЕРАТ**

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

**Нижний Новгород - 2016**

Работа выполнена в Научно-исследовательском физико-техническом институте и на кафедре физики полупроводников и оптоэлектроники Физического факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Научный консультант: **Павлов Дмитрий Алексеевич**  
доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой  
Физики полупроводников и оптоэлектроники ННГУ им. Н.И.  
Лобачевского

Официальные оппоненты **Тагиров Ленар Рафгатович**  
доктор физико-математических наук, Федеральное государственное  
автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Казанский (Приволжский) федеральный университет»,  
заведующий кафедрой Физики твёрдого тела.

**Голик Леонард Леонидович**  
доктор физико-математических наук, Фрязинский филиал  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова  
Российской академии наук, заведующий лабораторией  
Функциональной электроники

**Буданов Александр Владимирович**  
доктор физико-математических наук, Федеральное государственное  
бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
"Воронежский государственный университет инженерных  
технологий", Заведующий кафедрой Физики, теплотехники и  
теплоэнергетики

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской  
академии наук

Защита состоится «26» декабря 2016 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, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижегородского  
государственного университета им. Н.И. Лобачевского и на сайте **diss.unn.ru/644**.

Автореферат разослан «\_\_» 2016 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.166.01  
к.ф.-м.н.

Марычев Михаил Олегович

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Спинтроника – это динамично развивающаяся область науки и технологии, основанная на использовании, кроме заряда электронов в твердых телах, другого их фундаментального свойства – спина. Целью спинтроники является создание элементной базы микросхемотехники, функционирующей на основе новых физических принципов, которая станет перспективным направлением развития современной микроэлектроники.

Фундаментальные спин-зависимые явления могут быть использованы для улучшения параметров интегральных микросхем и приборов на их основе:

1) Снижение энергопотребления достигается за счёт использования схем с переносом спина без переноса заряда. В таких схемах ток, переносимый электрическим зарядом, равен нулю, а спиновый ток не равен нулю. Управление спином требует значительно меньших затрат энергии, чем перенос электрического тока.

2) Повышение быстродействия/производительности/объёма оперативной памяти. Современная электроника базируется на интеграции дискретных элементов. Для повышения производительности необходимо увеличивать число элементов на кристалле, что достигается за счёт уменьшения их размеров. Такой подход технически сложен и имеет пределы, связанные с достижением атомных размеров.

Спинтроника формирует методы реализации базовых функций электронной аппаратуры, основываясь непосредственно на спин-зависимых явлениях в твёрдом теле. В результате в приборах спинтроники уже на этапе выполнения базовых функций уменьшается количество необходимых элементов. Таким образом, экономится площадь кристалла, либо повышается производительность микросхемы.

3) Повышение надёжности/износостойкости. Достигается в перспективе за счёт отсутствия схем, использующих протекание электрического тока через полупроводниковую структуру. В случае отсутствия электрического тока становятся несущественными физические явления, приводящие к деградации полупроводниковых приборов: разогрев током, диффузия, электромиграция. Кроме того, переключение состояния элементов (с логического «нуля» на логическую «единицу») можно осуществлять путём перемагничивания, в этом случае элемент выдерживает большое количество циклов переключения.

Решение практических задач полупроводниковой спинтроники связано с использованием фундаментальных эффектов, обуславливающих спиновую поляризацию носителей заряда в неферромагнитных полупроводниках. Известен ряд подобных эффектов: спиновая поляризация в результате облучения циркулярно-поляризованным светом (Книга «Оптическая ориентация» под ред., Б.П. Захарчени, Ф. Майера, 1989), спиновая инжекция из ферромагнитного металла

(обзоры I. Zutic, S. Maekawa, M. Holub, 2004-2007), спиновая поляризация носителей в полупроводниках за счёт обменного взаимодействия с близкорасположенным ферромагнитным слоем (работы D.D. Awschalom, 2002-2005 гг., Б.П. Захарчени, 2003-2005 гг.). Наибольшие практические перспективы, на наш взгляд, имеют последние два из указанных выше эффектов, первый же, наиболее часто используется для анализа динамики спин-поляризованных носителей в полупроводниковых структурах.

В направлении применения эффектов инжекции и взаимодействия активные научные исследования ведутся по настоящее время (об этом можно судить по большому количеству публикаций 2014-2015 годов). Отдельно следует отметить работы, посвящённые созданию и исследованию **приборов** на основе эффекта спиновой инжекции: спинового светоизлучающего диода, спинового транзистора. Прогресс последнего времени в указанных исследованиях таков, что основные параметры работы приборов уже находятся на уровне коммерческих применений: значения степени спиновой поляризации выше 50 %, работа при комнатной температуре, низкий диапазон магнитных полей (например, исследования групп P. Varate, R. Wang (2014 год), T. Manago, H. Akinaga (2007-2008)). В то же время существует ряд нерешённых задач как фундаментального, так и технологического характера. К задачам технологического характера относится необходимость расширения спектра методов формирования приборов спинтроники, т.к. уже разработанные методы отличаются сложностью, дороговизной и низкой производительностью (это замечание в полной мере применимо к наиболее распространённому для создания приборов спинтроники методу молекулярно-лучевой эпитаксии). Сложность методов получения связана с главной тенденцией в технологии спинтроники – созданием совершенных структур с близкими к идеальным границами раздела. Поэтому, актуальным вопросом для применения более простых технологических подходов является максимальная степень неидеальности гетерограниц в структурах, при которой параметры работы приборов не выйдут за рамки допустимых диапазонов.

С указанным вопросом связаны задачи фундаментального характера, а именно, изучение влияния ростовых дефектов на спин-зависимый транспорт и спин-зависимую люминесценцию. Описанные выше вопросы в литературе почти не исследованы. Например, нами не было обнаружено сообщений о изучении эффекта спиновой инжекции или спиновой поляризации в структурах, сформированных методом газофазной эпитаксии, который, наряду с молекулярно-лучевой эпитаксией, является самым распространённым способом создания полупроводниковых эпитаксиальных структур (метод газофазной эпитаксии характеризуется наличием ростовых дефектов на границе ферромагнетик/полупроводник). В связи с вышеизложенным, затрагиваемые в настоящей работе вопросы создания ферромагнитных наноструктур методом газофазной эпитаксии и исследования в них эффектов спиновой

инжекции и обменного взаимодействия представляются актуальными для развития направления «спинтроника».

### **Цели и задачи работы.**

Целью работы является поиск путей применения технологии газофазной эпитаксии из металлорганических соединений и гидридов – МОС-гидридной эпитаксии (МОСГЭ) и импульсного лазерного осаждения (ИЛО) для создания полупроводниковых наноструктур, обеспечивающих управление спиновой поляризацией носителей заряда на основе эффектов спиновой инжекции и обменного взаимодействия.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие **задачи**:

- Анализ эффектов спиновой инжекции и обменного взаимодействия на основе известных экспериментальных результатов и теоретических моделей, а также с учётом свойств реальных структур, формируемых методами МОСГЭ и ИЛО;
- Создание методами МОСГЭ и ИЛО гетероструктур ферромагнетик/полупроводник, обеспечивающих управление спиновой поляризацией носителей заряда;
- Изучение свойств гетерограниц в сформированных структурах: степени разупорядочения, диффузионного перемешивания, влияния дефектов на рекомбинационные характеристики;
- Анализ влияния свойств границы раздела ферромагнетик/полупроводник на эффективность управления спиновой поляризацией носителей заряда путём исследования магнитоуправляемой циркулярно-поляризованной люминесценции сформированных структур. Определение условий, обеспечивающих спиновую поляризацию носителей.

### **Объекты исследования.**

Объектами исследования являлись полупроводниковые гетеронаноструктуры с квантовыми ямами  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  ( $x \approx 0,1-0,25$ ), содержащие ферромагнитные слои. В качестве ферромагнитных использованы наиболее изученные в мировой литературе слои разбавленного магнитного полупроводника  $(\text{A}^3, \text{Mn})\text{B}^5$  ( $\text{A}=\text{In}, \text{Ga}$ ;  $\text{B}=\text{As}, \text{Sb}$ ) и слои ферромагнитного металла Ni, Co, CoPt, кроме того, рассмотрена оригинальная конструкция, полученная при участии автора работы: ферромагнитные  $\delta\langle\text{Mn}\rangle$ -легированные слои в матрице GaAs. Структуры формировались комбинированным эпитаксиальным методом, сочетающим МОС-гидридную эпитаксию и импульсное лазерное осаждение, объединённые в одном реакторе. Геометрия слоёв и легирование полупроводниковой эпитаксиальной структуры обеспечивали формирование светоизлучающих диодов: диодов с барьером Шоттки, структур металл/туннельно-тонкий окисел/полупроводник,  $p-i-n$  диодов, диодов с туннельным барьером  $(\text{A}^3, \text{Mn})\text{B}^5/n++\text{GaAs}$ . При этом ферромагнитные слои используются как инжекторы спин-поляризованных электронов или дырок.

**Методы исследования.** Исследования структуры поверхности металлических контактов и поверхности полупроводника под металлическим контактом были выполнены с помощью метода дифракции электронов на отражение на электронографе ЭМР-102. Исследования структуры и состава поперечного среза образцов проведены на просвечивающем электронном микроскопе JEM-2100F (JEOL) с термо-полевым катодом. Снимки высокого разрешения обрабатывались в программе Digital Micrograph. Элементный состав определялся методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDS), реализованным посредством детектора X-max компании Oxford Instruments, смонтированного на микроскопе JEOL.

Элементный анализ приповерхностных областей структур осуществлялся с применением методик рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) на базе сверхвысоковакуумного комплекса Omicron Multiprobe RM, а также вторично-ионной масс-спектрометрии на масс-спектрометре MS-7201M.

Магнитополевые зависимости намагниченности исследовались при анализе измерений аномального эффекта Холла, а также измерялись на магнетометре переменного градиента силы, разработанном в Научно-исследовательском физико-техническом институте Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского (НИФТИ ННГУ).

Электрические свойства сформированных диодов изучались при измерении вольтамперных характеристик (ВАХ). Для измерений ВАХ в НИФТИ ННГУ разработан специальный измерительный алгоритм с использованием источника-измерителя токов и напряжений Keithley 2400. Для анализа ВАХ были выполнены расчёты зонной диаграммы и распределения носителей заряда в модельных одномерных структурах аналогичных сформированным в настоящей работе диодам. Расчёты выполнялись помощью программы 1D Poisson/Schrödinger для температур 10 К и 77 К.

Исследования спектров фото- и электролюминесценции выполнялись на универсальных спектральных установках, расположенных в НИФТИ ННГУ, которые включают монохроматоры МДР-3, МДР-23, набор лазеров для исследований фотолюминесценции, источники тока Keithley-6221, Keithley 2400 для исследований электролюминесценции. Также контрольные исследования выполнялись с использованием установок, расположенных в Институте Физики твёрдого тела РАН, г. Черноголовка, и в лаборатории Оптических свойств твёрдых тел Института Физики Глеб Ватагин (IFGW) при Университете г. Кампинас (UNICAMP), Кампинас, Бразилия.

Исследования циркулярно-поляризованной электролюминесценции выполнялись на базе перечисленных выше спектральных установок. Для измерений исследуемые образцы помещались во внешнее магнитное поле, электромагнитов (для измерений в диапазоне  $\pm 0,3$  Тл) либо сверхпроводящих соленоидов (для измерений в диапазоне  $\pm 10$  Тл).

Варьирование температуры измерений в электрических и люминесцентных методах измерения осуществлялось путём помещения образцов в сосуд Дьюара с жидким азотом (для измерений при 77 К) либо путём помещения образцов в криостат (гелиевый криостат замкнутого цикла Janis CCS-300S/202, гелиевый проточный криостат, гелиевый заливной криостат).

**Достоверность результатов** в экспериментальной части работы обеспечена использованием взаимодополняющих методов анализа, воспроизводимостью характеристик исследуемых объектов, многократной экспериментальной проверкой результатов измерений, использованием аттестованной измерительной техники. Также достоверность обеспечена совпадением в пределах погрешности характеристик структур, измеренных с использованием разного научного оборудования в разных научных группах (ИФТТ РАН, IFGW университет г. Кампинас).

### **Научная новизна работы.**

- 1) Впервые показана возможность спиновой инжекции как электронов, так и дырок в прямосмещенных диодах Шоттки Ni(Co)/GaAs. Из экспериментов на образцах спиновых светоизлучающих диодов (ССИД) с различной глубиной залегания активной области по отношению к границе раздела металл/GaAs определена эффективная длина потери спиновой ориентации дырок в эпитаксиальном слое GaAs (~ 67 нм при 1,5 К; ~ 60 нм при 10 К).
- 2) Впервые изучена природа дефектов границы раздела ферромагнетик/полупроводник (GaAs) в спиновых светоизлучающих диодах, а также выполнен анализ влияния этих дефектов на эффективность инжекции спин-поляризованных носителей.
- 3) Впервые была обнаружена немонотонная зависимость степени циркулярной поляризации, обусловленной спиновой инжекцией, от величины пространственного разделения ферромагнитного инжектора (CoPt) и активной области (квантовой ямы InGaAs). Обнаруженный эффект позволяет управлять параметрами циркулярно-поляризованного излучения, в том числе и знаком, при варьировании толщины покровного слоя в структурах. Предложена качественная модель, объясняющая полученный эффект; модель основана на эффекте спиновой прецессии инжектированных носителей заряда в магнитном поле ферромагнитного контакта CoPt.
- 4) Впервые показана возможность формирования спиновых светоизлучающих диодов, содержащих слои разбавленного магнитного полупроводника, с применением метода МОС-гидридной эпитаксии. Высокое совершенство и однородность формируемых слоёв достигаются за счёт комбинации метода МОС-гидридной эпитаксии с методом импульсного лазерного осаждения. Впервые показана возможность спиновой инжекции электронов и дырок в

структурах, содержащих слои разбавленного магнитного полупроводника, сформированных комбинированным методом МОСГЭ и ИЛО.

5) Впервые получена инжекция спин-поляризованных носителей при комнатной температуре в структурах на основе разбавленного магнитного полупроводника. Результат получен в структурах с инжектором типа (Ga,Mn)Sb и гетероструктуры InGaAs/GaAs.

6) Впервые был сформирован спиновый светоизлучающий диод на основе ферромагнитной гетероструктуры, представляющей собой квантовую яму InGaAs/GaAs и ферромагнитный  $\delta$ -Mn-легированный слой, расположенный вблизи квантовой ямы, в матрице GaAs. Отличительной особенностью диода является принцип циркулярно-поляризованной люминесценции, основанный на спиновой поляризации носителей в активной области в результате взаимодействия с близкорасположенным ферромагнитным слоем. Подобный принцип позволяет получить циркулярную поляризацию как фото- так и электролюминесценции.

7) Для спиновых светоизлучающих диодов, работающих на основе эффекта обменного взаимодействия, впервые продемонстрирована возможность управления знаком циркулярной поляризации ЭЛ при варьировании ростовых параметров.

#### **Практическая значимость работы.**

1) Разработана лабораторная технология создания спиновых светоизлучающих диодов, испускающих частично-циркулярно-поляризованный свет при комнатной температуре и в нулевом магнитном поле (за счёт остаточной намагниченности ферромагнитного слоя). Таким образом, выполнено большинство требований, предъявляемых к промышленным источникам циркулярно-поляризованного излучения.

2) Показано, что технология МОС-гидридной эпитаксии, в случае объединения с импульсным лазерным осаждением, применима для формирования спиновых светоизлучающих диодов, содержащих слои разбавленного магнитного полупроводника. Это открывает потенциальную возможность применения альтернативного метода - МОСГЭ, для создания приборов спинтроники (данный метод отличается дешевизной и высокой производительностью).

3) Показана возможность получения в диодах на основе разбавленных магнитных полупроводников циркулярно-поляризованной электролюминесценции при комнатной температуре.

4) Показана принципиальная возможность спиновой инжекции электронов, так и дырок для диодов, сформированных с применением подобных технологических операций. Вид спин-поляризованных носителей определяется геометрией структур. Использование обоих видов носителей расширяет функциональные возможности приборов спинтроники.

5) Показана принципиальная возможность применения эффекта взаимодействия носителей в активной области и ионов марганца в близкорасположенном ферромагнитном слое ( $\delta$ -Mn-слое) для создания спиновых светоизлучающих диодов с магнитоуправляемой циркулярно-поляризованной фото- и электролюминесценцией. Подобное технологическое решение отличается простотой, при этом обеспечивает степень спиновой поляризации, сравнимую с полученной для «стандартных» диодов, работающих на основе эффекта спиновой инжекции.

#### **Внедрение научных результатов.**

Основные научные результаты использованы при выполнении следующих НИР: Базовый госбюджет (РНП 2.2.2.2.4737, 2.2.2.2/4297, 2.1.1.3778, контракт 02.740.11.0672), РФФИ (03-02-16777, 05-02-16624, 07-02-01153, 08-02-00548, 08-02-97038, 09-02-00770, 09-02-90711-моб\_ст, 10-02-00739, 11-02-00645, 12-07-00433, 12-02-31230, 13-07-00982, 13-02-97140, 14-07-31280, 15-02-07824, 15-38-20642), ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг. (гранты № 14.В37.21.0346, 02.740.11.0672, П-1279), гранты Президента РФ (16.120.11.5359\_МК, МК-2708.2013.2), Проектная часть государственного задания (8.1054.2014/К)), а также Программы ОФН РАН «Спин-зависимые явления в твёрдых телах и спинтроника». Научные результаты работы легли в основу патента РФ (Светоизлучающий диод / О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, М.В. Дорохин, С.В. Зайцев, Б.Н. Звонков, В.Д. Кулаковский, М.М. Прокофьева / Патент Российской Федерации № 2400866, приоритет 22.05.2009, опубликовано 27.09.2010. Бюл. № 27.).

#### **Основные научные положения, выносимые на защиту.**

- 1) В диодах Шоттки ферромагнитный металл/GaAs и ферромагнитный металл/туннельно-тонкий диэлектрик/GaAs осуществляется спиновая инжекция **неосновных** носителей (электронов для  $p$ -GaAs, дырок для  $n$ -GaAs) в режиме **прямого** смещения диода. Спиновая инжекция неосновных носителей обуславливает циркулярную поляризацию возбуждаемого электролюминесцентного излучения.
- 2) В структурах CoPt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GaAs в режиме спиновой инжекции спин-поляризованные носители в GaAs находятся под воздействием внутреннего магнитного поля, которое обуславливает спиновую прецессию. Спиновая прецессия приводит к изменению знака и степени спиновой поляризации носителей. Источником внутреннего магнитного поля является неоднородно-намагниченный контакт CoPt.
- 3) Комбинированный метод МОС-гидридной эпитаксии и импульсного лазерного осаждения позволяет формировать спиновые светоизлучающие диоды, содержащие слои разбавленного магнитного полупроводника (A<sup>3</sup>,Mn)B<sup>5</sup> (A<sup>3</sup>=Ga, B<sup>5</sup>=As, Sb). Разбавленные магнитные полупроводники, содержащие кластеры MnA<sup>3</sup> или MnB<sup>5</sup> в матрице (A<sup>3</sup>,Mn)B<sup>5</sup>, обеспечивают спиновую инжекцию электронов при комнатной температуре в диодах с туннельным барьером.

4) Комбинированное исследование фото- и электролюминесценции светоизлучающих диодов, в которых варьируется расстояние между ферромагнетиком и активной областью излучающей полупроводниковой структуры, представляет собой метод анализа временных процессов спин-поляризованных носителей (спиновой релаксации, спиновой прецессии, спиновой поляризации), не требующий измерений с разрешением по времени.

5) Близкое расположение (менее 10 нм) ферромагнитного дельта-слоя Mn и квантовой ямы в структурах  $\delta\langle\text{Mn}\rangle/\text{GaAs}/\text{InGaAs}$  приводит к спиновой поляризации дырок в квантовой яме в результате обменного взаимодействия с атомами Mn в намагниченном дельта-слое. Спиновая поляризация дырок обуславливает циркулярную поляризацию люминесценции.

6) В структурах  $\delta\langle\text{Mn}\rangle/\text{GaAs}/\text{InGaAs}$  реализуется как ферромагнитное, так и антиферромагнитное взаимодействие дырок в квантовой яме и ионов Mn в  $\delta\langle\text{Mn}\rangle$ -слое в зависимости от ростовых параметров. Это обуславливает экспериментальную регистрацию положительного и отрицательного знаков степени циркулярной поляризации люминесценции, соответственно.

#### **Апробация работы.**

Основные результаты работы докладывались на международных симпозиумах «Нанозифика и нанозлектроника» (Нижний Новгород, 2005-15 гг.); Международных симпозиумах «Nanostructures: Science and technology» (С.-Петербург, 2005,2006,2010 гг., Новосибирск 2007 г., Нижний Новгород 2012 г.), Международной научной конференции «Тонкие пленки и наноструктуры» (Москва, 2005 г.), XIII конференции «Высокочистые вещества и материалы. Получение, анализ, применение» (Нижний Новгород, 2007 г., 2015 г.); Международной научной конференции «75 лет высшему образованию в Удмуртии», Ижевск, 2006; Евразийском симпозиуме по магнетизму (Казань 2007 г.); Российской конференции по физике полупроводников (2007,2009,2011,2013,2015 гг.), 14-м Евразийском симпозиуме по магнетизму EASTMAG (Екатеринбург, 2010 г.), Московском международном симпозиуме по магнетизму MISM (Москва 2011, 2014), II международной конференции по современным проблемам физики поверхности и наноструктур (Ярославль 2012), 5-й международной школе-конференции по спинтронике и технологиям квантовых вычислений Spintech (Краков, Польша 2009 г.), 31-й международной конференции по физике полупроводников ICPS-12 (Цюрих, Швейцария, 2012 г.), 18-м российском симпозиуме по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твёрдых тел (РЭМ-2013, г. Черноголовка), международной конференции «Физика, химия и применение наноструктур» Nanomeeting-2013 (Минск, Беларусь, 2013, 2015 г.), 15-м Европейском симпозиуме по газофазной эпитаксии EWMOVPE (Аахен, Германия, 2013 г.); 12 международной конференции-школы: Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики, физические свойства и применение

(Саранск, 2013); Международной конференции «Спиновая физика, химия и технология» SPCT-2015 (С. Петербург, 2015 г.), ряде других молодёжных конференций, а также на семинарах физического факультета и НИФТИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского.

### **Публикации.**

По материалам диссертации опубликовано более 100 научных работ, включая 32 статьи, входящие в перечень ВАК, 2 учебно-методических пособия.

### **Личный вклад автора.**

Автором внесён определяющий вклад в получение основных экспериментальных результатов и доработку методики исследования циркулярной поляризации применительно к электролюминесценции и фотолюминесценции гетероструктур InGaAs/GaAs. Также автор принимал участие в постановке, обсуждении и анализе всех экспериментов, которые не были выполнены лично им. Планирование экспериментов, обсуждение и анализ результатов проводились совместно с к.ф.-м.н., в.н.с. НИФТИ Ю.А. Даниловым и д.ф.-м.н., проф. Д.А. Павловым. Постановка ряда экспериментов и обсуждение результатов проведены со с.н.с. НИФТИ ННГУ, к.ф.-м.н. Е.А. Усковой, н.с. НИФТИ ННГУ к.ф.-м.н. А.В. Здравейцевым (исследование диодов Шоттки), с зав.лаб. ЛНЭП ИФТТ РАН д.ф.-м.н. В.Д. Кулаковским (исследования циркулярной поляризации).

Исследования фото- и электролюминесценции, а также часть исследований циркулярно-поляризованной люминесценции проведены автором самостоятельно. Часть экспериментов по исследованию циркулярно-поляризованной электролюминесценции, выполненных в НИФТИ ННГУ, произведена совместно с м.н.с. НИФТИ П.Б. Дёминой (исследования диодов Шоттки ферромагнитный металл/GaAs), м.н.с. НИФТИ Е.И. Малышевой (исследование диодов с инжектором, выполненным в виде  $(A^3, Mn)B^5$ , а также диодов с  $\delta<Mn>$ -легированным слоем), измерения циркулярной поляризации электролюминесценции структур, помещённых в сильное 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, к.ф.-м.н. А.С. Бричкиным, к.ф.-м.н. А.В. Черненко, а также совместно со с.н.с. НИФТИ, к.ф.-м.н. Н.В. Байдусем. Исследования циркулярно-поляризованной люминесценции в Лаборатории Оптических свойств твёрдых тел IFGW выполнены совместно с Ю.А. Даниловым и профессором Университета г. Кампинос Ф. Икава (F. Iikawa).

Анализ экспериментальных результатов и разработка теоретических моделей выполнены автором самостоятельно, а также совместно с П.Б. Дёминой (описание механизмов инжекции неосновных носителей в диодах Шоттки), Е.И. Малышевой (анализ и описание циркулярной поляризации в структурах InGaAs/GaAs с  $\delta<Mn>$ -слоем), м.н.с. И.Л. Калентьевой (анализ

ферромагнитных свойств и моделирование прыжковой проводимости в структурах GaAs с  $\delta$ -Mn-слоем).

Ферромагнитные свойства структур, а также аномальный эффект Холла исследованы н.с., к.ф.-м.н. А.В. Кудриным. Исследования кристаллической структуры и фазового состава выполнены в группе проф. Д.А. Павлова (асп. А.И. Бобров, асп. Н.В. Малехонова, студ. Ю.В. Усов). Исследования электронографии на отражение выполнены к.ф.-м.н. Е.А. Питиримовой. Исследования профилей концентрации в структурах ФМ металл/полупроводник выполнены сотрудником ФТИ УрО РАН Ф.З. Гильмутдиновым. Исследования фазового состава методом РФЭС выполнены доц. Физич. ф-та ННГУ, к.ф.-м.н. Д.Е. Николичевым, асп. Р.Н. Крюковым и м.н.с. НОЦ ФТНС С.Ю. Зубковым.

Светоизлучающие структуры изготовлены при участии автора в группе эпитаксиальной технологии НИФТИ ННГУ вед.н.с., к.ф.-м.н. Б.Н. Звонковым (выращивание структур), м.н.с. П.Б. Дёминой и с.н.с., к.ф.-м.н. А.В. Здоровейщевым (нанесение металлических и диэлектрических плёнок).

### **Структура и объём диссертации.**

Диссертация состоит из введения, литературного обзора, четырёх оригинальных глав, списка литературы и двух приложений. Общий объём диссертации составляет 454 страницы, включая 155 рисунков и 27 таблиц. Объём приложений составляет 5 страниц. Список цитируемой литературы содержит 405 наименований.

### **Основное содержание работы**

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель работы, основные задачи, научная новизна, практическая значимость и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен литературный обзор по физическим принципам генерации и детектирования спин-поляризованных носителей в гибридных гетероструктурах ферромагнетик/полупроводник. Наибольшее внимание уделено эффектам спиновой инжекции и спиновой поляризации в результате обменного взаимодействия. Эффект спиновой инжекции заключается в инжекции спин-поляризованных носителей в неферромагнитный полупроводник из намагниченного ферромагнитного (ФМ) электрода [1]. Эффект обменного взаимодействия носителей в полупроводнике с близкорасположенным ФМ слоем обуславливает равновесную спиновую поляризацию [2]. Для экспериментального исследования указанных эффектов предложено формирование спинового светоизлучающего диода (ССИД) – одного из базовых элементов спинтроники. Спиновые светоизлучающие диоды построены на гетероструктурах ферромагнетик/полупроводник, ферромагнитный слой используется для создания спиновой поляризации носителей в неферромагнитной активной области. Степень спиновой поляризации

рассчитывается по степени циркулярной поляризации рекомбинационного излучения, которое генерирует ССИД [1].

Классификация ССИД выполняется по виду структуры ферромагнетик/полупроводник, которая и обуславливает конкретный механизм спиновой поляризации носителей в активной области. Наибольшее распространение получили 4 вида структур:

- 1) Структуры ферромагнитный металл/полупроводник или ферромагнитный металл/туннельно-тонкий диэлектрик/полупроводник. Такие приборы работают на основе эффекта инжекции спин-поляризованных носителей из ФМ металла в полупроводник [1,3].
- 2) Структуры полуметалл  $MnV^5(MnA^3)$ /полупроводник, для которых характерны подобные первому случаю принципы спиновой инжекции [4].
- 3) Структуры на основе разбавленных магнитных полупроводников (РМП)  $(A^3,Mn)V^5/A^3V^5$ . Слои  $(A^3,Mn)V^5$  играют роль областей *p*-типа проводимости в светоизлучающих *p-i-n* диодах и диодах с туннельным барьером [5].
- 4) Структуры ферромагнетик/полупроводник, функционирующие на основе эффекта обменного взаимодействия. В этом случае активная область ССИД расположена на небольшом (1-10 нм) удалении от ферромагнитного слоя [6].

В заключительной части главы изложены основные методы получения гетероструктур ферромагнетик/полупроводник.

Во второй главе описаны применённые в работе методы формирования спиновых светоизлучающих диодов, а также рассмотрены кристаллическая структура и фазовый состав гетерограниц ферромагнетик/полупроводник для всех видов исследованных диодов. Для формирования структур использовалась оригинальная технология, представляющая собой комбинацию методов МОС-гидридной эпитаксии и импульсного лазерного осаждения в одном технологическом цикле. Были сформированы гетероструктуры, для которых ранее была показана возможность инжекции спин-поляризованных носителей из ферромагнитного слоя в неферромагнитный полупроводник:

- 1) структуры разбавленный магнитный полупроводник  $(A^3,Mn)V^5/GaAs$ ;
- 2) структуры ферромагнитный металл/полупроводник;
- 3) ферромагнитные полупроводниковые гетероструктуры  $\delta<Mn>/GaAs/InGaAs$ .

При формировании диодов на основе РМП и  $\delta<Mn>$ -легированных слоёв светоизлучающая полупроводниковая структура ССИД выращивается методом МОСГЭ при атмосферном давлении водорода, а ферромагнитные слои – в том же технологическом цикле в реакторе для МОСГЭ методом импульсного лазерного осаждения при пониженном давлении. Использование такого подхода связано с необходимостью снижения ростовой температуры до 350-450 °С, чего невозможно достичь методом МОСГЭ (для которого минимальное значение

~ 500 °С соответствует температуре разложения металл-органических соединений). Снижение температуры осаждения позволяет повысить однородность слоёв структуры и резкость гетерограниц, что является существенным фактором для наблюдения спин-зависимых эффектов. При формировании диодов с контактом ФМ металл/полупроводник светоизлучающая полупроводниковая структура ССИД выращивалась методом МОСГЭ, а ферромагнитный металлический электрод осаждался методом электронно-лучевого испарения в комбинированной вакуумной установке (при этом в технологический процесс вводился этап межоперационного хранения).

Во втором разделе второй главы приведены результаты исследований кристаллической структуры и фазового состава границы раздела ферромагнетик/полупроводник. Показано, что при осаждении ферромагнитного слоя в приповерхностную область полупроводниковой структуры вносятся дефекты различной природы. Основными видами дефектов являются нарушения кристаллической структуры, а также примесные атомы ферромагнетика, проникающие в полупроводниковую структуру в результате диффузии.

Особенностью формирования металлического инжектора является прерывание технологического процесса, связанное с перемещением образцов между ростовыми установками после выращивания полупроводниковой структуры ССИД. Это приводит к осаждению металла на окисленную, частично разупорядоченную поверхность, что обуславливает комплекс эффектов, связанных с диффузией атомов ФМ металла в область полупроводника. Профили концентрации элементов в области границы Co/GaAs, полученные методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, представлены на рисунке 1.

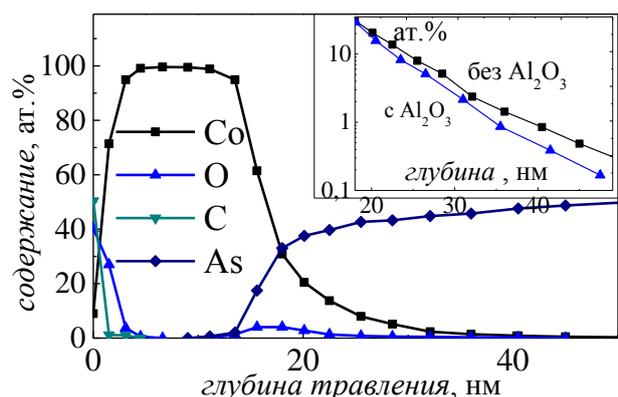


Рисунок 1 – Профили распределения элементов в структуре Co/GaAs, полученные методом РФЭС. На вставке показаны профили концентрации Co в GaAs при введении промежуточного слоя  $Al_2O_3$  и без него

По данным исследований имеет место диффузия атомов Co в GaAs на глубину до 30 нм (т.е. близко к положению активной области ССИД). Предположительно, диффузия атомов переходного металла сопровождается взаимодействием с атомами Ga и As и образованием интерметаллических соединений, являющихся центрами безызлучательной рекомбинации. Формирование промежуточного защитного слоя между ФМ металлом и полупроводником позволяет частично предотвратить эффекты,

связанные с диффузией атомов металла. В качестве такого слоя может выступать тонкая плёнка Au или слой диэлектрика  $Al_2O_3$  (замедление диффузии показано на вставке к рисунку 1).

Для другого исследованного вида инжектора - разбавленного магнитного полупроводника выявлены особенности формирования слоёв, связанные с применением метода импульсного лазерного осаждения. К таким особенностям относятся сравнительно большой размер частиц, осаждаемых на подложку, а также высокие температуры формирования слоёв (по сравнению с альтернативным методом МЛЭ). Указанные особенности проявляются:

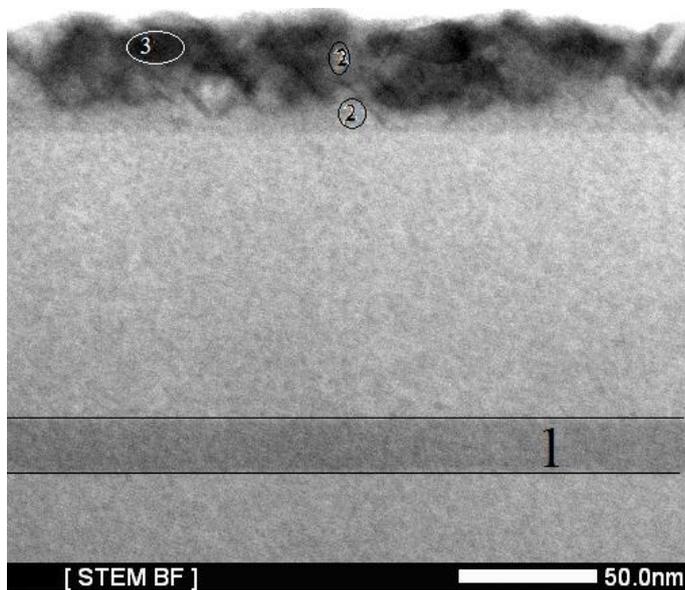


Рисунок 2 - Изображение поперечного среза (Ga,Mn)As/GaAs/InGaAs, полученное в режиме сканирующего просвечивающего электронного микроскопа. Отмеченные области соответствуют: (1) – КЯ InGaAs, (2) матрице (Ga,Mn)As; (3) кластерам (Ga)MnAs.

- в формировании многофазных слоёв, содержащих соединения MnGa или MnAs в матрице  $(A^3, Mn)B^5$  (для системы (Ga,Mn)As/GaAs такая картина показана на рисунке 2). Избежать формирования кластеров возможно при создании ФМ слоя путём  $\delta$ -Mn-легирования GaAs;
- в диффузионном «размывании» профилей концентрации, приводящем к переносу части атомов Mn к активной области светоизлучающей структуры.

В заключении отмечено, что с применением метода МОС-гидридной эпитаксии в комбинации с импульсным лазерным осаждением в потоке водорода

могут быть сформированы наиболее распространённые виды спиновых светодиодов на основе GaAs.

В третьей главе приводятся результаты исследований циркулярно-поляризованной электролюминесценции (ЭЛ) спиновых светоизлучающих диодов на основе гетероструктур InGaAs/GaAs с инжектором ферромагнитный металл/GaAs или ФМ металл/туннельно-тонкий диэлектрик/GaAs (рисунок 3). Свойства таких диодов наиболее близки к диодам Шоттки, именно этим термином структуры обозначены в работе. Отличием исследованных структур от известных аналогов спиновых светоизлучающих диодов является использование режима прямого смещения диода Шоттки (схема включения показана на рисунке 3). В указанном режиме смещения и при введении диодов во внешнее магнитное поле получено частично циркулярно-поляризованное излучение, т.е. интенсивность компоненты ЭЛ с  $\sigma^+$  поляризацией превышает интенсивность компоненты с  $\sigma^-$  поляризацией (рисунок 4). Расщепление линии, связанной с переходами в КЯ, обусловлено квантованием энергии в магнитном поле и образованием уровней Ландау [7].

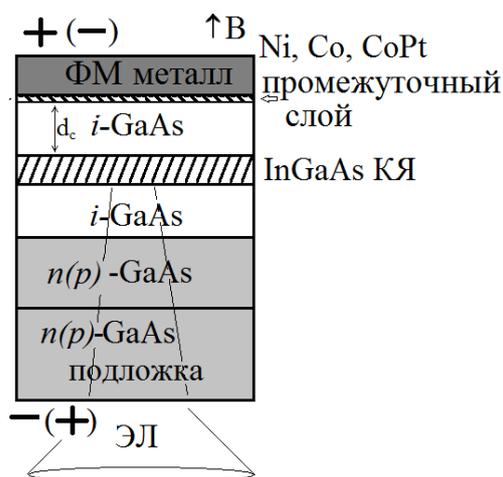


Рисунок 3 – Схематическое изображение диодов ФМ металл/GaAs с полярностями напряжения в режиме ЭЛ для структур на подложке  $n$ -GaAs ( $p$ -GaAs).

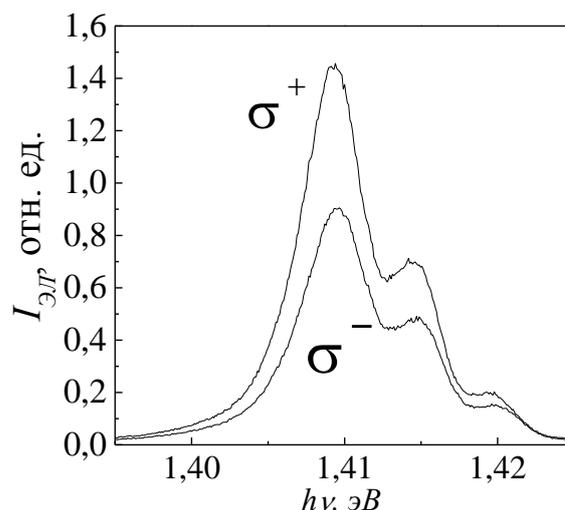


Рисунок 4 - Спектры ЭЛ для  $\sigma^+$  и  $\sigma^-$  поляризаций излучения (ток диода 5 мА) с контактом Шоттки Au/Co/Au и КЯ в магнитном поле  $B=5$  Тл,  $T=1,5$  К.

Количественной характеристикой циркулярно-поляризованной люминесценции является величина, называемая степень циркулярной поляризации, и определяемая соотношением:

$$P_{\text{ЭЛ,ФЛ}} = \frac{I(\sigma^+) - I(\sigma^-)}{I_{\text{ЭЛ,ФЛ}}}, \quad (1)$$

где  $P_{\text{ЭЛ}}$  – степень циркулярной поляризации ЭЛ,  $P_{\text{ФЛ}}$  – степень циркулярной поляризации фотолюминесценции (ФЛ),  $I_{\text{ЭЛ,ФЛ}} = I(\sigma^+) + I(\sigma^-)$  – суммарная интенсивность электро-, фотолюминесценции;  $I(\sigma^+)$  ( $I(\sigma^-)$ ) – интенсивности ЭЛ или ФЛ, записанные в  $\sigma^+$  ( $\sigma^-$ ) поляризациях.

Зависимость степени поляризации ЭЛ от магнитного поля для диодов Шоттки CoPt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ $n$ -GaAs/InGaAs/GaAs и CoPt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ $p$ -GaAs/InGaAs/GaAs представлена на рисунке 5.

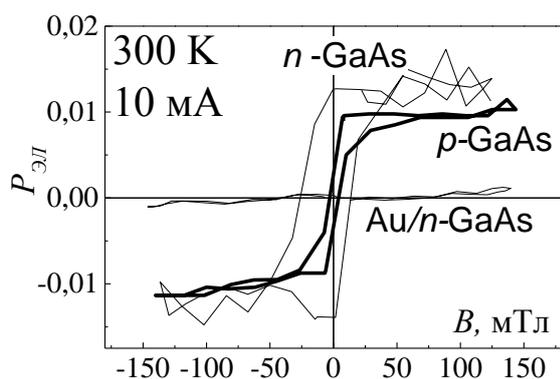


Рисунок 5 – Магнитополевая зависимость  $P_{\text{ЭЛ}}$  для структур CoPt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ $n$ -GaAs и CoPt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ $p$ -GaAs, а также для контрольной структуры Au/ $n$ -GaAs.

Зависимость является нелинейной с петлёй гистерезиса. Вид кривых характерен для магнитолевых зависимостей намагниченности ферромагнитного CoPt слоя [8], максимальное значение  $P_{\text{ЭЛ}}$  получено при насыщении намагниченности ферромагнетика. Для контрольной структуры, не содержащей ФМ слоя, полученное значение  $P_{\text{ЭЛ}}$  намного ниже, чем для спиновых светоизлучающих диодов (рисунок 5, кривая Au/ $n$ -GaAs). Данные, представленные на рисунке 5, подтверждают однозначную связь

полученной в эксперименте циркулярной поляризации ЭЛ с магнитными свойствами

инжектора. Для слоёв CoPt ось лёгкого намагничивания лежит в направлении, перпендикулярном плоскости контакта, что обуславливает насыщение намагниченности и  $P_{ЭЛ}$  в сравнительно небольшом поле  $\sim 70-100$  мТл (рисунок 5). Для слоёв Co, Ni ось лёгкого намагничивания перпендикулярна направлению магнитного поля, и для насыщения намагниченности и  $P_{ЭЛ}$  требуется приложение поля  $\sim 2$  Тл.

Показано, что в число физических явлений, обуславливающих спиновую поляризацию носителей и циркулярную поляризацию ЭЛ, входят:

- 1) Зеемановское расщепление уровней электронов и дырок в квантовой яме при введении структур во внешнее магнитное поле [9]. Зеемановское расщепление обуславливает циркулярную поляризацию ЭЛ контрольной структуры.
- 2) Эффект спиновой аккумуляции основных носителей в прямосмещённом барьере Шоттки ФМ металл/GaAs. Эффект связан с накоплением носителей спин-поляризованных носителей в приповерхностной области полупроводника за счёт спин-зависимого сопротивления металлического контакта [10].
- 3) Спиновая инжекция неосновных носителей в прямосмещённом барьере Шоттки ферромагнитный металл/*n*-GaAs [1]. Эффекты спиновой инжекции и аккумуляции связаны с введением и намагничиванием ферромагнитного контакта в исследованных структурах, они обуславливают сравнительно высокое (до 0,3) значение степени поляризации ЭЛ в исследованных диодах Шоттки.

В грубом приближении можно записать для степени циркулярной поляризации:

$$P_{ЭЛ} = P_{ЭЛ}^o + P_{ЭЛ}^n + P_{ЭЛ}^z, \quad (2)$$

где  $P_{ЭЛ}^o$  – компонента степени циркулярной поляризации, связанная со спиновой аккумуляцией основных носителей;  $P_{ЭЛ}^n$  – компонента поляризации, связанная со спиновой инжекцией неосновных носителей;  $P_{ЭЛ}^z$  – компонента поляризации, связанная с Зеемановским расщеплением уровней.

Выделение вклада  $P_{ЭЛ}^z$  в выражении (2) выполняется путём сопоставления значений  $P_{ЭЛ}$  для контрольной структуры (для которой  $P_{ЭЛ} = P_{ЭЛ}^z$ ). Разделение  $P_{ЭЛ}^o$  и  $P_{ЭЛ}^n$  выполняется путём измерений циркулярной поляризации в структурах, отличающихся расстоянием от активной области до ФМ инжектора ( $d_c$ ). Такое исследование было выполнено для структур с контактом Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GaAs/InGaAs/*n*-GaAs и AuCoAu/GaAs/InGaAs/*n*-GaAs. Для диодов на основе *n*-GaAs основными носителями заряда являются электроны, неосновными – дырки, т.е. реализуется ситуация спиновой аккумуляции электронов ( $P_{ЭЛ}^o = P_{ЭЛ}^e$ ) и спиновой инжекции дырок ( $P_{ЭЛ}^n = P_{ЭЛ}^h$ ).

На рисунке 6 представлены зависимости степени поляризации ЭЛ от величины  $d_c$  для диодов, помещённых в магнитное поле различной величины. Согласно теории [1,11] степень поляризации максимальна на границе металла и полупроводника, а по мере удаления вглубь структуры  $P_{ЭЛ}$  убывает по закону:

$$P_{ЭЛ}^{e(h)} = P_0 \exp\left(\frac{-d_c}{\lambda_{Ne(h)}}\right), \quad (3)$$

величина  $\lambda_{Ne}$  играет роль характерной длины спиновой диффузии электронов,  $\lambda_{Nh}$  – длина спиновой диффузии дырок,  $P_0$  – циркулярная поляризация на границе ферромагнетика и полупроводника (при  $d_c=0$ ). Для структуры с трёхслойным контактом AuCoAu/n-GaAs, помещённой в магнитное поле  $\sim 0,3$  Тл, величина  $P_{ЭЛ}$  слабо зависит от толщины покровного слоя (рисунок 6, кривая 1), при этом значение степени поляризации выше, чем для контрольной структуры (для последней  $P_{ЭЛ} \approx 0,0005$ ). Слабое изменение степени поляризации на масштабе  $\sim 100$  нм характерно для спин-поляризованных электронов (т.к.  $\lambda_{Ne} \sim 6$  мкм в GaAs [12]).

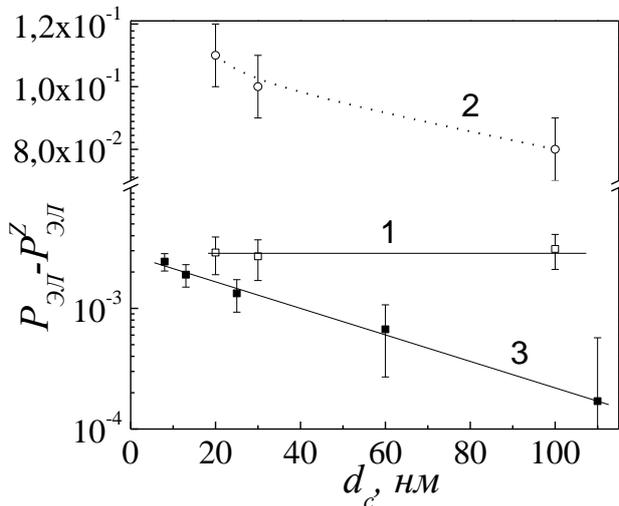


Рисунок 6 – Зависимость  $P_{ЭЛ}$  от толщины покровного слоя в структурах (1) AuCoAu/n-GaAs  $B=0,3$ Тл,  $T=2$ К; (2) – та же структура,  $B=2,5$ Тл,  $T=2$ К; (3) – структура Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GaAs,  $B=0,3$ Тл,  $T=10$ К. Величина  $P_{ЭЛ}$  построена за вычетом значения, связанного с Зеемановским расщеплением уровней

инжекции дырок с ростом магнитного поля может быть обусловлено подавлением механизмов спиновой релаксации [13].

Для диода с контактом Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/n-GaAs, введённого в магнитное поле 0,3 Тл, зарегистрировано монотонное уменьшение  $P_{ЭЛ}$  с ростом толщины покровного слоя. Величина степени циркулярной поляризации за вычетом вклада Зеемановского расщепления уровней

Поэтому циркулярную поляризацию ЭЛ  $P_{ЭЛ} \sim 0,003$  в магнитном поле 300 мТл можно связать со спиновой аккумуляцией электронов в структуре с контактом AuCoAu/n-GaAs. При этом компонента поляризации, связанная со спиновой инжекцией дырок, пренебрежимо мала, т.е. спиновая инжекция дырок отсутствует. Для большего значения магнитного поля (2,5 Тл) и той же структуры показано, что значение  $P_{ЭЛ}$  с ростом  $d_c$  уменьшается (рисунок 6, кривая 2). Изменение вида зависимости  $P_{ЭЛ}(d_c)$  относительно случая 0,3 Тл мы связываем с внесением вклада спиновой инжекции дырок ( $P_{ЭЛ}^n$  в формуле (2)) в значение степени циркулярной поляризации. Увеличение вклада спиновой

$(P_{ЭЛ} - P_{ЭЛ}^z)$  может быть описана функцией  $e^{d_C/\lambda_{NH}}$  (рисунок 6, кривая 3). Следовательно, циркулярную поляризацию ЭЛ в случае структуры Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/n-GaAs можно связать со спиновой инжекцией дырок. Спиновая аккумуляция электронов пренебрежимо мала, т.к. на масштабах  $d_C \sim 100$  нм значение  $P_{ЭЛ}^n$  уменьшается до величины ниже погрешности измерений (длина спиновой диффузии дырок, согласно [5],  $\sim 80$  нм при 5 К), значение степени поляризации, согласно (2) определяется как  $P_{ЭЛ} - P_{ЭЛ}^z = P_{ЭЛ}^o \approx 0$ . Полученный результат согласуется с результатами измерений вольтамперных характеристик и электролюминесценции, согласно которым доминирующим механизмом протекания тока в диодах Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/n-GaAs является рекомбинационный. В этом случае большая часть основных носителей рекомбинирует в активной области и не переносится к ферромагнитному электроду. Для структур AuCoAu/n-GaAs, напротив, доля рекомбинационного тока сравнительно невелика, поэтому большая часть основных носителей переносится к ФМ контакту, в результате чего осуществляется спиновая поляризация за счёт эффекта спиновой аккумуляции.

Значение степени циркулярной поляризации в фиксированном магнитном поле зависит от вида границы раздела (Таблица 1). Наименьшие значения  $P_{ЭЛ}$  получены для структур с контактом Co/GaAs. Введение тонкого промежуточного слоя (Au или Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) между ФМ металлом и полупроводником позволяет повысить степень циркулярной поляризации.

Таблица 1. Максимальные значения $P_{ЭЛ}$ для разных контактов		
Контакт (В)	$P_{ЭЛ}(8 \text{ Тл})$	$P_{ЭЛ}^n(0,1 \text{ Тл})$
<b>Au</b>	<b>0,10</b>	<b>0</b>
Ni	0,30	0
Co	0,20	0
Au/Ni/Au	0,42	0
Au/Co/Au	0,42	0
CoPt/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-----	0,04
Во второй колонке приведены значения $P_{ЭЛ}$ , обусловленные спиновой инжекцией неосновных носителей		

Зависимость  $P_{ЭЛ}$  от вида контакта связывается с рассеянием спин-поляризованных носителей на дефектах в приповерхностной области GaAs вблизи границы с ФМ слоем (дефектообразование при осаждении ФМ металла было показано в главе 2). Использование промежуточного слоя Au или Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> защищает структуру от воздействия дефектов, что снижает спиновую релаксацию на гетерогранице и, как следствие, способствует повышению эффективности спиновой инжекции и спиновой аккумуляции.

Низкое значение  $P_{ЭЛ}$  в структурах Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/n-GaAs связано с отсутствием насыщения намагниченности Co контакта в использованном магнитном поле. Использование контакта CoPt позволяет изменить характер магнитной анизотропии слоя и снизить диапазон магнитных полей до  $\sim 100$  мТл (рисунок 5).

В заключении третьей главы рассмотрен эффект прецессии спин-поляризованных носителей, инжектированных из контакта CoPt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в GaAs. Прецессия имеет место при низких температурах (10 К) в магнитном поле неоднородно намагниченного контакта CoPt и

экспериментально проявляется в осцилляциях зависимости  $P_{ЭЛ}$  от толщины покровного слоя (рисунок 7).

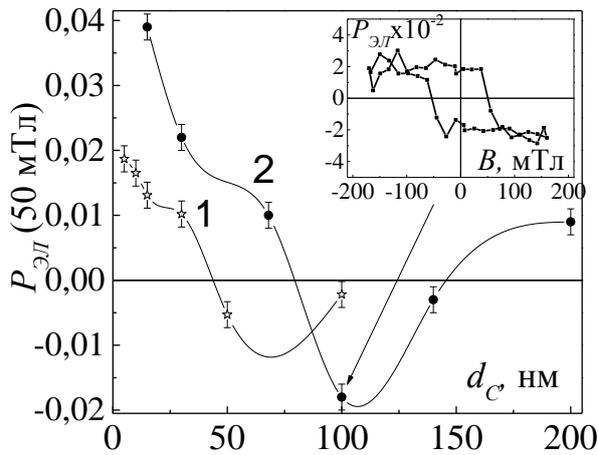


Рисунок 7 - Зависимость  $P_{ЭЛ}$  от толщины покровного слоя диодов с контактом CoPt: 1 –на подложке  $n$ -GaAs; 2 –на  $p$ -GaAs.  $T=10$  К,  $B=50$  мТл. На вставке показана кривая  $P_{ЭЛ}(B)$  для  $P_{ЭЛ}<0$ .

Осцилляции зарегистрированы как для случая спиновой инжекции электронов (CoPt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ $p$ -GaAs), так и для спиновой инжекции дырок (CoPt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ $n$ -GaAs). Источником магнитного поля является неоднородно намагниченный CoPt электрод. Неоднородное намагничивание подтверждается сопоставлением магнитопольевых зависимостей  $P_{ЭЛ}$  и намагниченности. Перпендикулярная к нормали компонента поля контакта вызывает прецессию спина с частотой

$$w_L = \frac{|g|\mu_B}{\hbar} |B_{FM}|, \quad (4)$$

где  $g$  – фактор Ландэ,  $\mu_B$  – магнетон Бора,  $\hbar$  -

постоянная Планка,  $B_{FM}$  – магнитное поле контакта. За время дрейфа изменяется направление спина и на расстоянии  $l$  от границы Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GaAs равно

$$l(\pi) = v_d t(\pi) = v_d \frac{\pi}{w_L} \quad (5)$$

направление спина носителей меняется на противоположное (здесь  $v_d$  – дрейфовая скорость). Это обуславливает изменение знака степени циркулярной поляризации на обратный для структур с  $d_c \approx 60$  нм при инжекции дырок и  $d_c \approx 110$  нм при инжекции электронов (рисунок 7).

В четвёртой главе приводятся результаты исследования спиновой инжекции в диодах, содержащих слои разбавленного магнитного полупроводника (A<sup>3</sup>,Mn)B<sup>5</sup> (A=Ga,In; B=As,Sb). Рассмотрены две конструкции ССИД, обеспечивающие спиновую инжекцию дырок и электронов:  $p$ - $i$ - $n$  диод, содержащий слой (A<sup>3</sup>,Mn)B<sup>5</sup> в качестве полупроводника  $p$ -типа, и  $p$ - $n$ - $i$ - $p$  диод с туннельный барьером на границе (A<sup>3</sup>,Mn)B<sup>5</sup>/ $n$ +GaAs (рисунок 8), соответственно. Диоды сформированы комбинированным методом МОС-гидридной эпитаксии и ИЛО, особенности метода рассмотрены в рамках описания Главы 2. Диоды (A<sup>3</sup>,Mn)B<sup>5</sup>/ $i$ -GaAs/InGaAs/ $n$ -GaAs представляют собой структуры с  $p$ - $n$  переходом (рисунок 8, слева). В режиме прямого электрического смещения (положительный потенциал на (A<sup>3</sup>,Mn)B<sup>5</sup> по отношению к базе  $n$ -GaAs) из разбавленного магнитного полупроводника в активную область инжектируются спин-поляризованные дырки.

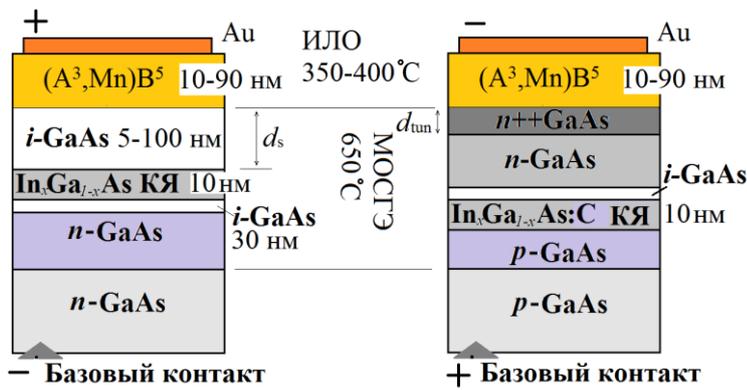


Рисунок 8 - Схема диодов, содержащих слои РМП (Ga,Mn)As (10-90 нм), (Ga,Mn)Sb (10-50 нм), (In,Mn)As (10-90 нм). Слева – диод *p-i-n*, справа – диод с туннельным слоем.

быстрое увеличение  $P_{ЭЛ}$  с ростом  $B$  от 0 до 100 мТл и медленное изменение  $P_{ЭЛ}$  при  $B > 100$  мТл. Вид кривых при низких температурах подобен магнитопольным зависимостям намагниченности (Ga,Mn)As [14]. Такое подобие является косвенным подтверждением спиновой инжекции в спиновых светоизлучающих диодах. Эффект спиновой аккумуляции в структурах отсутствует ( $P_{ЭЛ}^o = 0$ , формула 2), т.к. в *p-i-n* диодах доминирующим механизмом токопереноса является протекание рекомбинационного тока, что подтверждается исследованиями ВАХ.

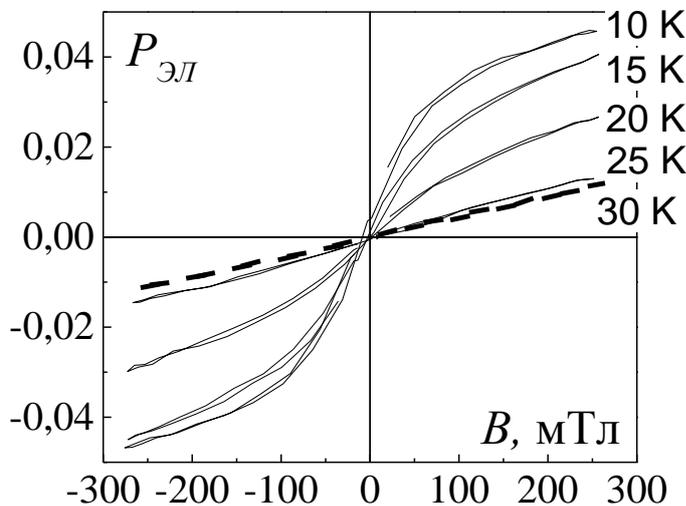


Рисунок 9 - Магнитопольные зависимости  $P_{ЭЛ}$ , измеренные для структуры (Ga,Mn)As/*i*-GaAs/*n*-GaAs  $T=10-30$  К, ток диода 2 мА.

оценивается как температура Кюри ферромагнитного (Ga,Mn)As, что согласуется с результатами магнитотранспортных исследований [14].

Значение  $P_{ЭЛ}$  в структурах  $(A^3,Mn)B^5/i$ -GaAs/InGaAs/*n*-GaAs существенно зависит от вида границы раздела между слоем РМП и GaAs. В Таблице 2 приведено сравнение

В результате рекомбинации с неполяризованными электронами, инжектированными из подложки *n*-GaAs, генерируется циркулярно-поляризованное ЭЛ излучение. Магнитопольная зависимость степени поляризации для диодов (Ga,Mn)As/*i*-GaAs/InGaAs/*n*-GaAs представлена на рисунке 9.

Зависимость является нелинейной функцией магнитного поля: видно

Точка перегиба на зависимости  $P_{ЭЛ}(B)$  соответствует насыщению намагниченности (Ga,Mn)As, а увеличение  $P_{ЭЛ}$  при  $B > 100$  мТл связано с Зеемановским расщеплением уровней ( $P_{ЭЛ}^z$ , формула 2). С повышением температуры выше 30 К вид зависимости  $P_{ЭЛ}(B)$  изменяется: уменьшается степень циркулярной поляризации и исчезает участок быстрого роста  $P_{ЭЛ}$  в низком магнитном поле (т.е. зависимость  $P_{ЭЛ}(B)$  при  $T > 30$  К может быть описана линейной функцией). Значение  $T=30$ К

полученных значений степени циркулярной поляризации ЭЛ для структур, отличающихся видом ферромагнитного инжектора ((Ga,Mn)As, (In,Mn)As, (Ga,Mn)Sb), но с одинаковыми значениями расстояния от активной области до ФМ инжектора (толщина спейсерного слоя –  $d_s=30$  нм).

Таблица 2 – Наибольшие полученные значения $P_{ЭЛ}$ структур с различным ФМ слоем ( $T=10$ К, $B=250$ мТл)	
ФМ слой	$P_{ЭЛ}$ (max)
(Ga,Mn)As	0,018
(Ga,Mn)Sb	0,008
(In,Mn)As	0

На основании данных Таблицы 2 видно снижение степени циркулярной поляризации при использовании контактов (Ga,Mn)Sb/GaAs и (In,Mn)As/GaAs (здесь  $P_{ЭЛ}$  уменьшается до нуля) по сравнению с (Ga,Mn)As/*n*-GaAs. Подобное изменение связывается со вкладом рассеяния спин-поляризованных носителей при инжекции через гетерограницу (A<sup>3</sup>,Mn)B<sup>5</sup>/*i*-GaAs, содержащую дефекты кристаллической структуры и примесные атомы Mn. Наибольшая однородность характерна для контакта (Ga,Mn)As/GaAs, что было показано в главе 2. Для структуры (Ga,Mn)Sb/GaAs зарегистрированы неоднородности и нарушения кристаллической структуры на гетерогранице [15], что, по нашему мнению, обуславливает снижение степени циркулярной поляризации ЭЛ при тех же параметрах образцов. В случае контакта (In,Mn)As/GaAs концентрация дефектов на гетерогранице ещё выше, чем для (Ga,Mn)Sb/GaAs, а значение степени поляризации для диода (In,Mn)As/GaAs снижается до нуля (Таблица 2).

В втором разделе работы рассмотрены поляризационные характеристики люминесценции структур с туннельным слоем (схема показана на рисунке 8 справа). Указанные структуры работают в режиме туннельного барьера: При приложении электрического смещения как показано на рисунке 8 (справа) имеет место туннелирование связанных валентных электронов из слоя (A<sup>3</sup>,Mn)B<sup>5</sup> в зону проводимости *n*-GaAs. Наличие туннельного тока может быть проиллюстрировано вольтамперными характеристиками, которые для структур (Ga,Mn)As/*n*+GaAs показаны на рисунке 10. Эквивалентная электрическая схема структур представляет собой два *p-n* перехода, включённых навстречу друг другу. Резкое увеличение тока при отрицательном напряжении (на (Ga,Mn)As подаётся отрицательный относительно базы потенциал) связано с туннелированием электронов из валентной зоны разбавленного магнитного полупроводника. Инжектированные из РМП электроны поляризованы по спину. Это обуславливает циркулярную поляризацию ЭЛ излучения, которое генерируется при рекомбинации этих электронов с дырками, инжектированными из подложки *p*-GaAs.

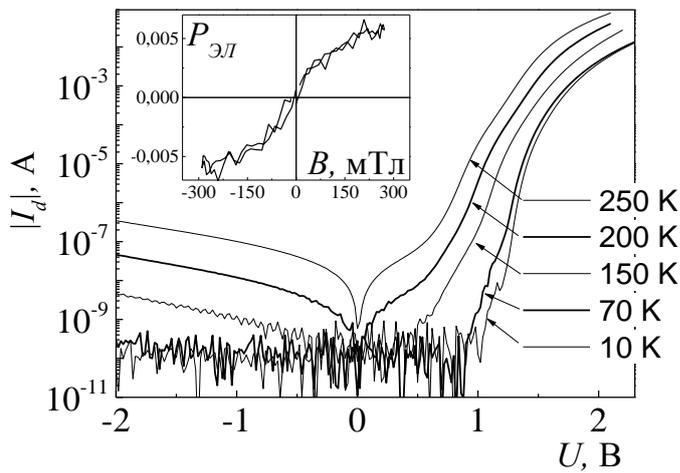


Рисунок 10 - ВАХ диода с туннельным слоем (Ga,Mn)As/n+GaAs, измеренные при разных температурах. На вставке показана кривая  $P_{эл}(B)$  диода (10 K).

максимумом при  $d_{tun}=15$  нм связывается с особенностями зонной диаграммы.

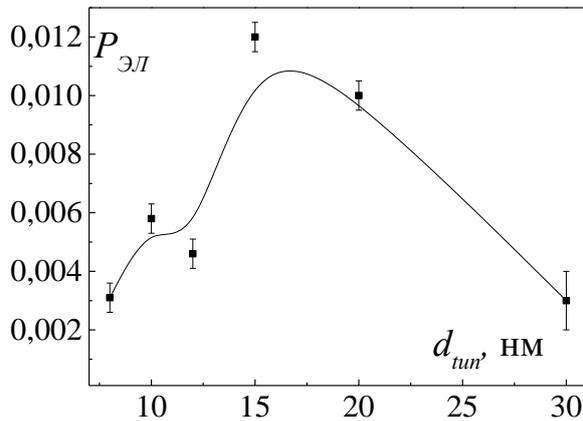


Рисунок 11 - Зависимость  $P_{эл}(d_{tun})$ , для структур (Ga,Mn)As/n+GaAs,  $T=10$  K, ток 10 мА,  $B=250$  мТл.

Для структур с  $d_{tun} > 12$  нм значительную роль играют процессы термической активации электронов для преодоления барьера  $n++/n$  перехода (рисунок 12б). Поскольку энергии связанных электронов с «основным» и «неосновным» спином в (Ga,Mn)As различаются [16], вероятности надбарьерной эмиссии электронов с «основным» и «неосновным» спином также будут различаться. Это вносит дополнительный вклад в спиновую поляризацию тока и, таким образом, приводит к повышению  $P_{эл}$ . Аналогичный механизм усиления степени поляризации ЭЛ был рассмотрен для структур с туннельным барьером (Ga,Mn)As/GaAs/AlGaAs [16,17]. Вклад такого механизма нивелируется при повышении температуры измерений, однако резкое уменьшение  $P_{эл}$ , связанное с достижением точки Кюри, не позволяет провести подобное наблюдение. Повышение толщины туннельного слоя выше 15 нм не приводит к изменению высоты барьера на границе  $n++/n$  (это согласуется с данными ВАХ). Зарегистрированное в

Зависимость  $P_{эл}(B)$  (вставка к рисунку 10) при низких температурах подобна случаю  $p-i-n$  диода (Ga,Mn)As/ $i$ -GaAs/InGaAs/ $n$ -GaAs (рисунок 9) и также определяется магнитными свойствами  $(A^3, Mn)B^5$  инжектора. Значение степени циркулярной поляризации в области насыщения намагниченности (при  $B=100$  мТл) зависит от параметров структуры, а именно, от толщины туннельного слоя ( $d_{tun}$ ), как показано на рисунке 11. Подобный вид зависимости с

Для структур с небольшой толщиной туннельного слоя диаграмма имеет вид, показанный на рисунке 12а. В этом случае характерна независимая от температуры инжекция спин-поляризованных электронов – туннелирование из валентной зоны (Ga,Mn)As. Эффективность спиновой инжекции определяется расщеплением зоны для носителей с разным спином в (Ga,Mn)As (такой вывод согласуется с работами по исследованию аналогичных структур,

эксперименте уменьшение  $P_{ЭЛ}$  при  $d_{\text{тун}} > 15$  нм связано с повышением спинового рассеяния электронов при переносе в  $n^{++}$ -GaAs слое большей толщины.

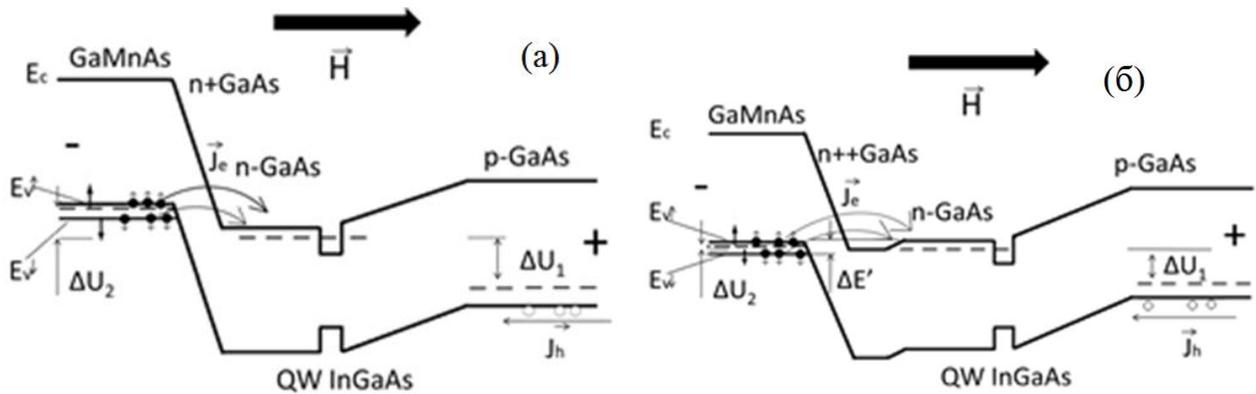


Рисунок 12 - Изображение зонной диаграммы туннельного диода в магнитном поле и при подаче прямого смещения: (а) толщина  $d_{\text{тун}}$  меньше области обеднения; (б)  $d_{\text{тун}}$  больше области обеднения. Стрелками обозначены токи спин-поляризованных носителей.

Зависимость степени поляризации от кристаллического совершенства гетерограниц для структур с туннельным слоем выражена гораздо слабее, по сравнению со случаем  $p$ - $i$ - $n$  диодов. Так, значение  $P_{ЭЛ}$  при насыщении намагниченности (Ga,Mn)Sb для структур с контактом (Ga,Mn)Sb/ $n^{++}$ -GaAs/ $n$ -GaAs/InGaAs/ $p$ -GaAs сопоставимо с таковым для диодов с (Ga,Mn)As инжектором с подобными параметрами полупроводниковой структуры ( $P_{ЭЛ} = 0,006$ ).

На рисунке 13 показаны магнитополевые зависимости степени циркулярной поляризации ЭЛ диода на основе структуры (Ga,Mn)Sb/ $n^{++}$ -GaAs с туннельным слоем, измеренные при температуре 10 К (1) и 300 К (2).

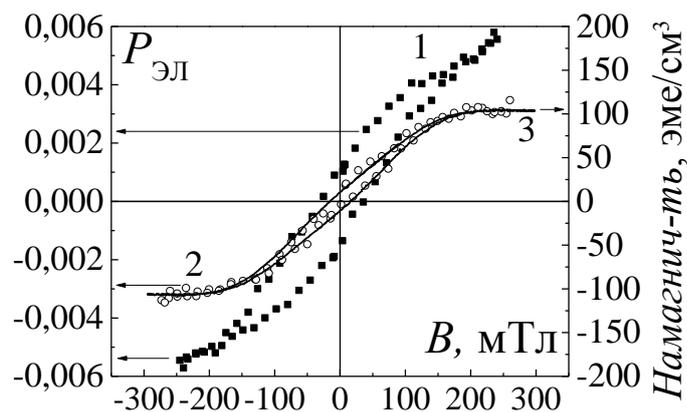


Рисунок 13 - Зависимости  $P_{ЭЛ}(B)$  для диода (Ga,Mn)Sb/ $n^{++}$ -GaAs,  $T = 10$  К (1 - квадраты) и 300 К (2 - круги), ток 5 мА; 3 - зависимость намагниченности от магнитного поля для слоя (Ga,Mn)Sb толщиной 30 нм

Зависимость  $P_{ЭЛ}(B)$  для  $T = 300$  К подобна магнитополевой зависимости намагниченности. Сохранение магнитных свойств (Ga,Mn)Sb до 300 К, показанное ранее в [15], обеспечивает регистрацию циркулярно-поляризованной люминесценции при комнатной температуре, что является рекордом для разбавленных магнитных полупроводников.

Ферромагнетизм слоёв при 300 К связан с формированием двухфазной системы, содержащей кластеры MnGa, именно

MnGa и сохраняет магнитные свойства при 300 К. Некоторое снижение  $P_{ЭЛ}$  с ростом температуры от 10 до 300 К связывается со уменьшением длины спиновой диффузии [1].

В пятой главе представлены результаты исследований спиновых светоизлучающих диодов на основе гетероструктур InGaAs/GaAs, содержащих  $\delta\langle\text{Mn}\rangle$ -слой в матрице GaAs (рисунок 14).

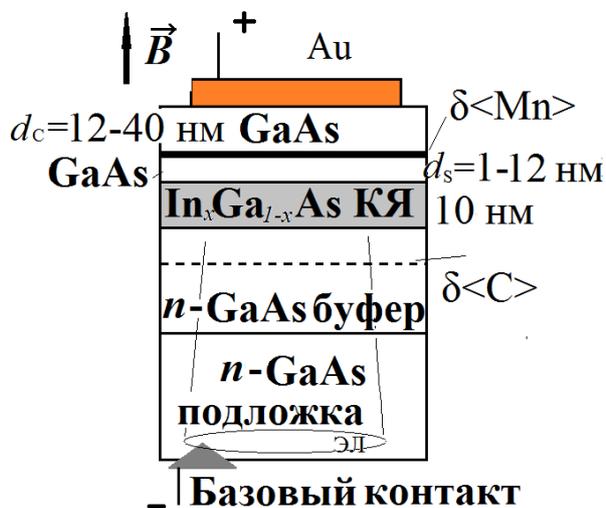


Рисунок 14 Схема исследованных ССИД с  $\delta\langle\text{Mn}\rangle$ -слоем в режиме ЭЛ.

представляют собой промежуточный случай между диодами Шоттки и  $p$ - $i$ - $n$  диодами. Введение акцепторного  $\delta\langle\text{Mn}\rangle$ -легированного слоя в приповерхностную область вносит изменения в зонную диаграмму диода Шоттки Au/ $n$ -GaAs. В результате происходит уменьшение потенциального барьера для неосновных носителей в диодах с  $\delta\langle\text{Mn}\rangle$ -легированием [18]. Это проявляется в существенном повышении интенсивности электролюминесценции диодов с  $\delta\langle\text{Mn}\rangle$ -слоем по сравнению с диодами без  $\delta$ -легирования (на 2 порядка). При одинаковых условиях возбуждения интенсивность ЭЛ сопоставима с таковой для  $p$ - $i$ - $n$  диодов [18].

Для структур  $\delta\langle\text{Mn}\rangle$ /GaAs/InGaAs исследованы магнитопольные зависимости степени циркулярной поляризации фото- и электролюминесценции (рисунок 15). Зависимости, представленные на рисунке 15, подобны магнитопольным зависимостям  $P_{ЭЛ}(B)$ , полученным для диодов с инжектором (Ga,Mn)As (рисунок 9). Вид кривых определяется магнитными свойствами (Ga,Mn)As. Зависимость степени поляризации от магнитного поля может быть приблизительно представлена как сумма двух слагаемых:

$$P_{ЭЛ} = P_{ЭЛ}^{FM} + P_{ЭЛ}^z, \quad (6)$$

где  $P_{ЭЛ}^{FM}$  – компонента степени циркулярной поляризации, связанная с ферромагнитными свойствами  $\delta\langle\text{Mn}\rangle$ -слоя. Величина  $P_{ЭЛ}^{FM}$  насыщается в магнитном поле  $\sim 100$  мТл, соответствующем насыщению намагниченности  $\delta\langle\text{Mn}\rangle$  [18]. Величина  $P_{ЭЛ}^z$  – компонента, связанная с Зеемановским расщеплением уровней, данная компонента обуславливает сравнительно слабое увеличение степени поляризации с ростом поля при  $B > 100$  мТл. В отличие

В работе исследованы серии структур с варьированием содержания Mn  $Q_{Mn}$  (0,1-0,3 монослоя, один монослой соответствует поверхностной концентрации равной  $6,3 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ), толщины спейсерного слоя между  $\delta\langle\text{Mn}\rangle$  и квантовой ямой ( $d_s$ ), толщины покровного слоя GaAs ( $d_c$ ), концентрации дырок в структуре за счёт введения дополнительных легированных слоёв (например,  $\delta\langle\text{C}\rangle$ -слоя перед КЯ).

С точки зрения электрической схемы показанные на рисунке 14 структуры

от случая диодов с однородно-легированным слоем (Ga,Mn)As, для структур с  $\delta\langle\text{Mn}\rangle$ -легированием значения степени циркулярной поляризации фото- и электролюминесценции совпадают, т.е.  $P_{\text{ЭЛ}}=P_{\text{ФЛ}}$  во всём исследованном диапазоне магнитных полей (рисунок 15). Подобная закономерность была получена для большого набора образцов из серии исследованных структур (на рисунке 15 показана типовая зависимость). Согласно критерию, предложенному в [19], совпадение степени циркулярной поляризации для ФЛ и ЭЛ является свидетельством отсутствия инжекции спин-поляризованных носителей из ферромагнитного контакта в активную область структуры. При этом значения степени  $P_{\text{ЭЛ}}$  и  $P_{\text{ФЛ}}$  в несколько раз превышают таковые для контрольных структур (рисунок 15, без Mn).

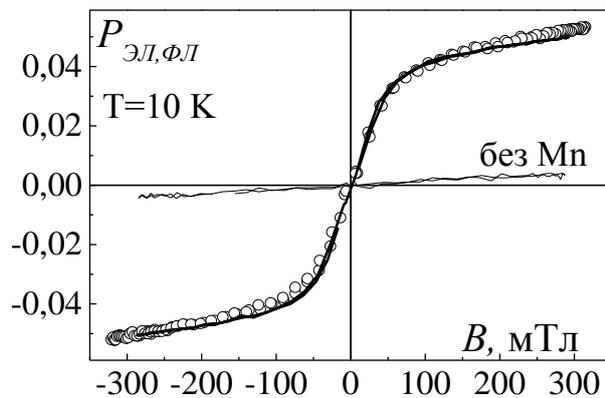


Рисунок 15 - Зависимости степени поляризации от магнитного поля для ФЛ (точки) и ЭЛ (линии) структур InGaAs/GaAs/ $\delta\langle\text{Mn}\rangle$ , и ЭЛ контрольной структуры (без Mn).  $T=10\text{ K}$ , ток диода 5 мА/мощность накачки ФЛ 6 мВт

эксперименте циркулярной поляризации и намагниченности  $\delta\langle\text{Mn}\rangle$ -слоя. В структурах со спиновой инжекцией степень циркулярной поляризации определяется соотношением (3)

$$P_{\text{ЭЛ}} = P_0 \exp\left(-\frac{d_c}{\lambda_{N\hbar}}\right) \text{ и зависит от двух параметров: } P_0 = P_0(B, T) \text{ и } \lambda_{N\hbar} = \lambda_{N\hbar}(B, T),$$

являющихся функциями температуры измерений и внешнего магнитного поля [21,22]. Таким образом, прямое сопоставление намагниченности и  $P_{\text{ЭЛ}}$  невозможно. Для структур  $\delta\langle\text{Mn}\rangle/\text{GaAs}/\text{InGaAs}$  прямая связь намагниченности ( $M$ ) ФМ слоя и степени циркулярной поляризации ( $P_{\text{ЭЛ}}$ ) подтверждается подобием магнитополевых зависимостей степени поляризации и относительной намагниченности, определённой из измерений аномального эффекта Холла (рисунок 16). Исследование зависимости  $P_{\text{ЭЛ}}(T)$  диодов, введённых в магнитное поле 100 мТл, позволяет, таким образом, анализировать механизмы ферромагнитного упорядочения  $\delta\langle\text{Mn}\rangle$ -слоя. Согласно результатам анализа, для структур с  $\delta\langle\text{Mn}\rangle$ -легированием

Последнее свидетельствует о влиянии  $\delta\langle\text{Mn}\rangle$ -слоя на спиновую поляризацию носителей в КЯ. Механизмом, обуславливающим такое влияние, и рассмотренным ранее в литературе, является равновесная поляризации дырок в квантовой яме в результате их взаимодействия с магнитными ионами Mn в  $\delta$ -слое [18,20]. Взаимодействие с ионами Mn приводит к спиновой поляризации дырок, инжектированных в квантовую яму в режиме ЭЛ или ФЛ.

Важным следствием отсутствия спиновой инжекции в структурах  $\delta\langle\text{Mn}\rangle/\text{GaAs}/\text{InGaAs}$  является прямая связь регистрируемой в

характерен перколяционный механизм ФМ упорядочения, рассмотренный ранее для разбавленных магнитных полупроводников [23,24]. Согласно [23,24], подобный механизм характерен для (Ga,Mn)As со сравнительно низкой концентрацией дырок, что вполне соответствует исследованным структурам [25].

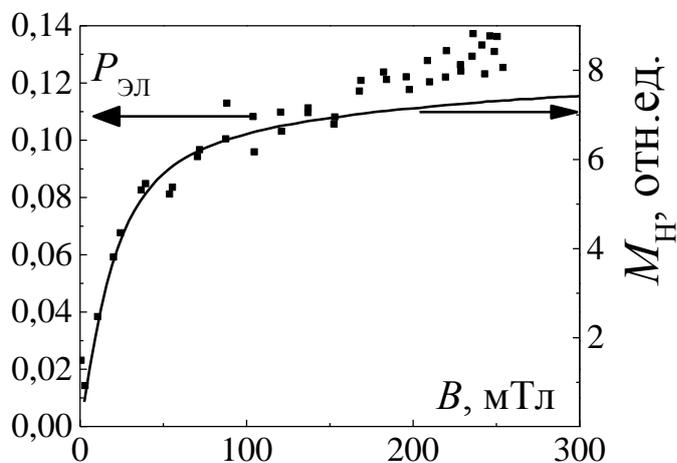


Рисунок 16 Магнитополевая зависимость  $P_{эл}$  (точки) и относительной намагниченности (линия) структуры  $\delta<Mn>/GaAs/InGaAs$ .  $T=10$  К, ток диода– 5 мА.

Согласно перколяционной модели, ферромагнитное состояние в материале, легированном магнитной примесью, существенно зависит от конфигурации локализованных магнитных моментов в системе. В неупорядоченном ферромагнетике со случайным распределением магнитной примеси ориентация данного магнитного момента системы определяется энергией обменного взаимодействия с ближайшими магнитными центрами, которая экспоненциально убывает при увеличении расстояния между ними. При низкой температуре, когда энергия обменного взаимодействия выше тепловой энергии, эффективно взаимодействуют все магнитные центры и РМП находится в ферромагнитно-упорядоченном состоянии. При повышении температуры удалённые магнитные центры не взаимодействуют с остальной магнитной системой и не участвуют в упорядочении. При температуре выше точки Кюри система разбивается на не связанные между собой магнитные кластеры [26].

Для количественного описания перколяционной модели используется математическая теория протекания [26]. Применение указанной теории для исследованных структур позволяет выполнить качественную оценку температурной зависимости степени поляризации при насыщении намагниченности. При  $T=0$  все спины ориентированы параллельно. Относительная намагниченность  $M(T)/M(0)$  равна вероятности того, что данный магнитный центр принадлежит упорядоченному кластеру. Эта вероятность получена в [26], в диссертационной работе по данным [26] была рассчитана зависимость  $M(T)/M(0)$  от  $T/T_C$ . На рисунке 17 представлены экспериментальные точки температурной зависимости  $P_{эл}$ , пересчитанные в относительные единицы ( $P_{эл}^{FM}(T)/P_{эл}^{FM}(0)$  от  $T/T_C$ ). Данные получены для структур, отличающихся содержанием Mn в  $\delta$ -слое. Также на графике построено семейство рассчитанных зависимостей  $M(T)/M(0)$ .

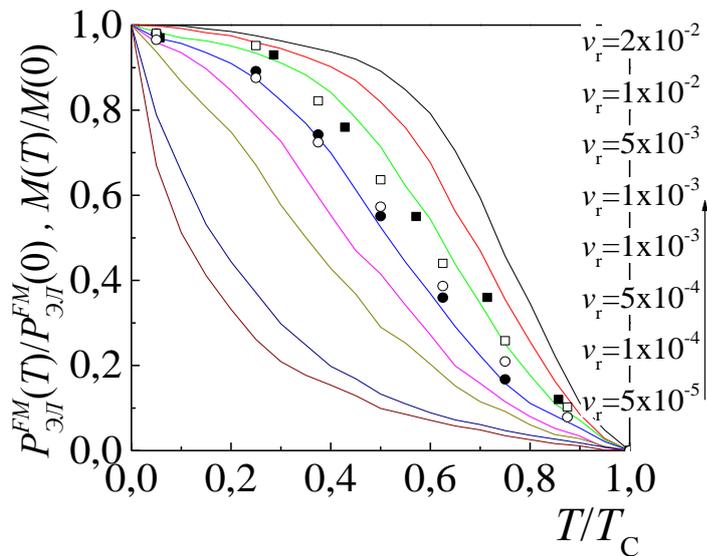


Рисунок 17 - Семейство температурных зависимостей относительной намагниченности неупорядоченного ферромагнетика с параметром  $v_R$  (линии), а также зависимости относительной степени поляризации  $P_{эл}^{FM}(T)/P_{эл}^{FM}(0)$  от относительной температуры для  $\delta<Mn>$  структур с  $Q_{Mn} = 0,3$  МС (квадраты), и с  $Q_{Mn} = 0,1$  МС (круги).

видно, что экспериментальные результаты совпадают с результатами моделирования зависимостей  $M(T)/M(0)$ . Принадлежность экспериментальных результатов к кривой с тем или иным параметром связана с различием в содержании атомов Mn. Для структуры с содержанием Mn 0,3 монослоя (рисунок 17 квадраты) параметр  $v_R$  в 2,5 раза выше по сравнению со структурой с  $Q_{Mn}=0,1$  монослоя (рисунок 17 круги), что является согласованным результатом, поскольку значение  $v_R$  меняется пропорционально концентрации магнитных центров (7).

В заключении главы рассмотрен эффект изменения знака степени циркулярной поляризации в зависимости от параметров структур. Эффект заключается в варьировании знака слагаемого  $P_{эл}^{FM}$  в формуле (6) при изменении таких параметров структур как  $Q_{Mn}$ , толщина спейсерного слоя  $d_s$ , толщина покровного слоя GaAs над  $\delta<Mn>$   $d_c$  (рисунок 18). При «положительном» знаке  $P_{эл}^{FM}$ , в соответствии с формулой (1), интенсивность  $\sigma^+$  поляризованной компоненты превышает интенсивность  $\sigma^-$  поляризованной компоненты (вставка к рисунку 18), положительный знак степени поляризации всегда характерен для слагаемого  $P_{эл}^Z$ , связанного с Зеемановским расщеплением уровней в КЯ. В случае «отрицательного» знака  $P_{эл}$   $I(\sigma^-) > I(\sigma^+)$ . Для таких структур компоненты  $P_{эл}^{FM}$  и  $P_{эл}^Z$  входят в формулу (6) с разным знаком. В небольшом магнитном поле и при низкой температуре  $|P_{эл}^{FM}| > P_{эл}^Z$ , это обуславливает отрицательную суммарную степень поляризации (рисунок 18б). При повышении

Параметром кривых семейства является безразмерная величина

$$v_R = \frac{4}{3} \pi N_F R^3, \quad (7)$$

которая соответствует количеству взаимодействующих магнитных центров ( $N_F$ ) в объеме с радиусом  $R$  (этот радиус соответствует расстоянию, на котором потенциал обменного взаимодействия уменьшается в  $e$  раз). Измерения выполнены в магнитном поле, соответствующем насыщению намагниченности  $\delta<Mn>$ -слоя. Значение  $P(0)$  получено экстраполяцией в точку  $T=0$ . За значение точки Кюри ( $T_C$ ) принималась температура, при которой значение  $P_{эл}^{FM}=0$  (6). Из рисунка 17

температуры или  $B$  величина  $P_{\text{ЭЛ}}^Z$  становится выше  $|P_{\text{ЭЛ}}^{\text{FM}}|$ , что обуславливает инверсию знака на положительный (рисунок 18,  $T=25$  К). Полученный эффект связывается с варьированием знака спиновой поляризации дырок в квантовой яме. Согласно [18,20] циркулярная поляризация ЭЛ в структурах  $\delta\langle\text{Mn}\rangle/\text{GaAs}/\text{InGaAs}$  обусловлена спиновой поляризацией дырок в КЯ, которая, в свою очередь связана с обменным взаимодействием с ионами Mn в  $\delta$ -слое. Гамильтониан обменного взаимодействия дырок и ионов Mn обсуждался в [27], общее выражение:

$$\hat{H}_{h-Mn} = N_0\beta \sum (\vec{j}\vec{S}_n) |\psi(\vec{r})|^2 \delta(\vec{r} - \vec{R}_n) d^3r, \quad (8)$$

где  $N_0\beta$  – параметр обменного взаимодействия,  $S_n$  – спиновый оператор иона Mn в позиции  $R_n$ ,  $\vec{j}$  – угловой момент дырки, а  $\psi, \vec{r}$  – волновая функция и координата дырок [28]. Суммирование по всем магнитным ионам. В соответствии с указанной моделью, инверсия знака спиновой поляризации дырок может связывается с изменением знака параметра обменного взаимодействия  $N_0\beta$ . Подобный эффект рассмотрен теоретически и экспериментально в [29], согласно [29] знак  $N_0\beta$  зависит от электрического состояния Mn в GaAs (ионизованный или нейтральный акцептор).

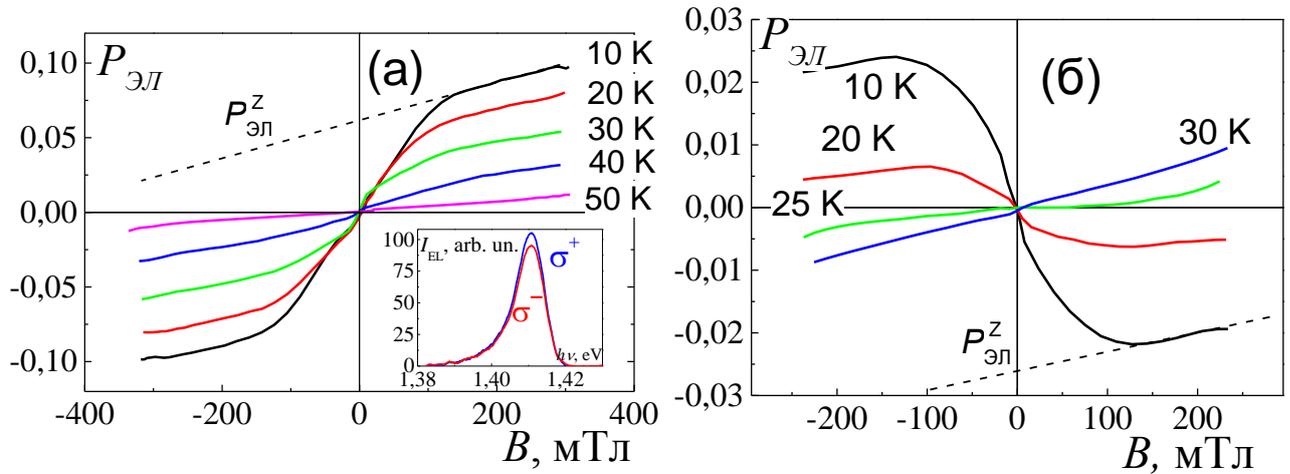


Рисунок 18 – Зависимости  $P_{\text{ЭЛ}}(B)$  для структур  $\delta\langle\text{Mn}\rangle/\text{GaAs}/\text{InGaAs}$ , с разной толщиной покровного слоя: (а)  $d_c=40$  нм, (б)  $d_c=12$  нм. Пунктиром обозначена компонента  $P_{\text{ЭЛ}}$ , связанная с Зеемановским расщеплением ( $P_{\text{ЭЛ}}^Z$ ). На вставке к (а) спектры ЭЛ, записанные при 10 К в  $\sigma^+$  и  $\sigma^-$  поляризациях.

В силу низкой концентрации дырок в исследованных структурах (концентрация дырок на порядок ниже концентрации Mn) можно предположить наличие как ионизованных ( $A^-$ ), так и нейтральных ( $A^0$ ) акцепторов. В этом случае величина  $N_0\beta$  является усреднённым по площади значением. Знак  $N_0\beta$  зависит от параметров структур и может меняться при варьировании расстояния от  $\delta\langle\text{Mn}\rangle$  до поверхности (в силу захвата носителей на поверхностные состояния), а

также других ростовых параметров (содержания Mn в структурах ( $Q_{Mn}$ ), толщины спейсерного слоя  $d_s$ ).

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы.

В диссертационной работе рассмотрены эффекты спиновой инжекции и обменного взаимодействия носителей в гетероструктурах ферромагнетик/полупроводник, сформированных с применением комбинированного метода МОС-гидридной эпитаксии и импульсного лазерного осаждения. Получены и исследованы основные известные из литературы материалы для инжекции спин-поляризованных носителей: ферромагнитные металлы (структура металл/туннельно-тонкий диэлектрик/полупроводник- МТОП) и разбавленные магнитные полупроводники (структуры  $p-i-n$  диодов и диодов с туннельным барьером  $(A^3, Mn)B^5/n+-GaAs$ ). Предложена оригинальная конструкция светоизлучающего диода на основе структуры InGaAs/GaAs с ферромагнитным  $\delta<Mn>$ -легированным слоем в GaAs барьере.

1) Впервые показана спиновая инжекция неосновных носителей в диодах Шоттки ферромагнитный металл/GaAs и ферромагнитный металл/туннельно-тонкий диэлектрик/GaAs. Спиновая инжекция обуславливает циркулярно-поляризованную электролюминесценцию.

2) Помимо спиновой инжекции для диодов ФМ металл/GaAs вклад в циркулярную поляризацию электролюминесценции вносит эффект спиновой аккумуляции (накопления спин-поляризованных носителей в приконтактной области полупроводника из-за спин-зависимого сопротивления ФМ контакта). Вклады спиновой инжекции и аккумуляции в циркулярно-поляризованную люминесценцию являются аддитивными, т.е. эффект спиновой аккумуляции повышает измеряемое в эксперименте значение степени поляризации ЭЛ. В структурах МТОП ток основных носителей не переносится в область ферромагнитного электрода, а расходуется на излучательную рекомбинацию с неосновными носителями, в таком случае эффект спиновой аккумуляции пренебрежимо мал.

3) Получена немонотонная зависимость степени циркулярной поляризации электролюминесценции от толщины спейсерного слоя GaAs для МТОП структур с контактом CoPt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GaAs/InGaAs. Подобный вид зависимости связывается с прецессией спин-поляризованных носителей заряда при переносе к активной области в магнитном поле неоднородно-намагниченного слоя CoPt.

4) Комбинированный ростовой метод, объединяющий МОС-гидридную эпитаксию с импульсным лазерным осаждением в одном реакторе, позволяет формировать спиновые светоизлучающие диодные структуры на основе квантовых ям InGaAs/GaAs и слоёв разбавленного магнитного полупроводника  $(A^3, Mn)B^5$  ( $A=Ga, In$ ;  $B=As, Sb$ ), причём слои РМП играют роль областей  $p$ -типа проводимости в светоизлучающих  $p-i-n$  диодах и диодах с

туннельным барьером. Механизм электролюминесценции зависит от вида зонной диаграммы контакта  $(A^3, Mn)B^5/GaAs$ , при этом может быть реализовано несколько случаев: прямая инжекция дырок, туннелирование электронов, инжекция или туннелирование со вкладом термического заброса.

5) Получена циркулярно-поляризованная электролюминесценция ССИД с инжектором  $(A^3, Mn)B^5/GaAs$ , которая связана со спиновой инжекцией из слоя РМП: в режиме  $p-i-n$  диода инжектируются спин-поляризованные дырки, в режиме диода с туннельным барьером – электроны. При уменьшении расстояния между  $(Ga, Mn)As$  слоем и активной областью значение степени циркулярной поляризации повышается, что связано с уменьшением деполяризации за счёт спинового рассеяния носителей при переносе к активной области. В структурах с туннельным барьером  $(Ga, Mn)Sb/n+GaAs$  получена спиновая инжекция при комнатной температуре, что является рекордом для разбавленных магнитных полупроводников.

6) В структурах ферромагнетик/полупроводник с реальной границей раздела эффективность спиновой инжекции снижается по сравнению со случаем идеального контакта вследствие спинового рассеяния на дефектах, вносимых в приповерхностную область полупроводника в результате осаждения ферромагнитного слоя. К таким дефектам относятся разупорядочение кристаллической структуры и примесные центры ферромагнитного слоя в полупроводнике. Формирование кристаллически-упорядоченной границы, а также использование промежуточных защитных слоёв, замедляющих диффузию магнитной примеси, позволяет понизить концентрацию дефектов и повысить эффективность спиновой инжекции и степень циркулярной поляризации ССИД.

7) Сформированы и исследованы спиновые светоизлучающие диоды на основе гетероструктур  $i-GaAs/InGaAs/n-GaAs$ , содержащих  $\delta<Mn>$ -легированный слой в  $i-GaAs$  барьере. Структуры представляют собой промежуточный случай между диодом с барьером Шоттки и  $p-i-n$  диодом, и характеризуются высокой интенсивностью электролюминесценции, а также циркулярно-поляризованной компонентой в люминесцентном излучении. Последнее связывается с влиянием  $\delta<Mn>$ -слоя на спиновую поляризацию носителей в КЯ.

8) Для структур  $\delta<Mn/i-GaAs/InGaAs/n-GaAs$  показано совпадение магнитополевых зависимостей степени циркулярной поляризации фото- и электролюминесценции, а также подобие этих зависимостей магнитополевой зависимости относительной намагниченности. Это позволяет сделать вывод, что циркулярная поляризация люминесценции связана со спиновой поляризацией носителей в квантовой яме, которая появляется в результате взаимодействия с ионами  $Mn$  в близкорасположенном дельта-слое.

9) Ферромагнитное упорядочение в  $\delta<Mn>$ -слое, как и взаимодействие дырок в квантовой яме с ионами  $Mn$  в  $\delta$ -слое, подчиняются закономерностям, характерным для теории неупорядоченных

разбавленных ферромагнетиков. В рамках указанной теории, магнитные свойства структур существенно зависят от конкретной технологической конфигурации. Для исследованных структур это проявляется в варьировании магнитополевой и температурной зависимостей степени поляризации люминесценции при изменении технологических параметров. В частности, при варьировании толщины спейсерного слоя и/или содержания Mn в  $\delta$ -слое зарегистрировано изменение знака  $R_{ЭД,ФЛ}$ , что объясняется сложным характером взаимодействия ионов Mn и дырок в КЯ, включающим возможность как ферромагнитного, так и антиферромагнитного обменного взаимодействия (с заряженными или нейтральными акцепторами).

### **Список цитированной литературы:**

- [1] Holub, M. Spin-polarized light-emitting diodes and lasers / M. Holub, P. Bhattacharya // J. Phys. D: Appl. Phys. - 2007. - V.40. - P.R179–R203.
- [2] Захарченя, Б.П. Интегрируя магнетизм в полупроводниковую электронику / Б.П. Захарченя, В.Л. Коренев // УФН. - 2005. - Т.175, вып.6. - С.629-635.
- [3] Comparison of Fe/Schottky and Fe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tunnel barrier contacts for electrical spin injection into GaAs / O.M.J. van't Erve, G. Kioseoglou, A.T. Hanbicki, et.al. // Appl. Phys. Lett. - 2004. - V.84, n.21. - P.4334-4336.
- [4] Efficient electron spin injection in MnAs-based spin-light-emitting-diodes up to room temperature / E.D. Fraser, S. Hegde, L. Schweidenback, et.al.// Appl. Phys. Lett. - 2010. - V.97. - P. 041103.
- [5] Optical, electrical and magnetic manipulation of spins in semiconductors / D.K. Young, J.A. Gupta, E. Johnston-Halperin, et.al. // Semicond. Sci. Tech. - 2002. - V.17. - P.275-284.
- [6] Myers, R.C. Tunable spin polarization in III-V quantum wells with a ferromagnetic barrier / R.C. Myers, A.C. Gossard, D.D. Awschalom // Phys.Rev. B. - 2004. - V.69. P.161305(R).
- [7] 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, et.al. // Appl. Phys. Lett. - 2006. - V. 89, n. 18. - P. 181118.
- [8] Ферромагнитный инжектор CoPt в светоизлучающих диодах Шоттки на основе наноразмерных структур InGaAs/GaAs / А.В. Здравейцев, М.В. Дорохин, П.Б. Демина, и др. // Физика и техника полупроводников. – 2015. – Т.49, В.12. – С.1649-1653.
- [9] Zeeman spin splittings in semiconductor nanostructures / R. Kotlyar, L.T. Reinecke, M. Bayer, A. Forchel // Phys. Rev. B. - 2001. - V.63. - P.085310.
- [10] Spin accumulation near Fe/GaAs (001) interfaces: The role of semiconductor band structure / Q.O. Hu, E.S. Garlid, P.A. Crowell, C.J. Palmstrom // Phys. Rev. B. - 2011. - V.84. - P. 085306.

- [11] Spintronics: Fundamentals and applications / I. Zutic, J. Fabian, S. Das Sarma // *Rev. Mod. Phys.* - 2004. - V.76. - P.323-410.
- [12] Giant enhancement of spin detection sensitivity in (Ga,Mn)As/GaAs Esaki diodes / J. Shiogai, M. Ciorga, M. Utz, et.al. // *Phys. Rev. B.* - 2014. - V.89. - P.081307(R).
- [13] Оптическая ориентация // под. ред. Б.П. Захарчени, Ф. Майера. Ленинград: Наука (ленингр. отделение). - 1989. - 408 С.
- [14] Влияние напряжений сжатия и растяжения в слоях GaMnAs на их магнитные свойства / Б.Н. Звонков, О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, и др. // *ФТТ.* - 2010. - Т.51, вып.11. - С.2124-2127.
- [15] Исследования структуры ферромагнитного слоя GaMnSb / А.И. Бобров, Е.Д. Павлова, А.В. Кудрин, Н.В. Малехонова // *ФТП.* - 2013. - Т.47, в.12. - С.1613-1616.
- [16] Very high spin polarization in GaAs by injection from a (Ga,Mn)As Zener diode / P. Van Dorpe, Z. Liu, W. Van Roy, et.al. // *Appl. Phys. Lett.* - 2004. - V.84, n.18. - P.3495-3497.
- [17] Effect of n+-GaAs thickness and doping density on spin injection of GaMnAs/n+-GaAs Esaki tunnel junction / M. Kohda, Y. Ohno, F. Matsukura, H. Ohno // *Physica E* - 2006. - V.32. - P.438-441.
- [18] Emission properties of InGaAs/GaAs heterostructures with delta < Mn >-doped barrier / M.V. Dorokhin, Yu.A. Danilov, P.B. Demina, et.al // *J. of Phys. D-Appl. Phys.* - 2008. - V. 41 - P. 24.
- [19] Schmidt, G. Spin injection into semiconductors, physics and experiments / G. Schmidt, L.W. Molenkamp // *Semicond.Sci.Tech.* - 2002. - V.17. - P.310-321.
- [20] Myers, R.C. Tunable spin polarization in III-V quantum wells with a ferromagnetic barrier / R.C. Myers, A.C. Gossard, D.D. Awschalom // *Phys.Rev. B.* - 2004. - V.69. P.161305(R).
- [21] Вонсовский, С.В. Магнетизм / С.В. Вонсовский // М. Наука. - 1971. - 1032 С.
- [22] Concepts in spin electronics / Ed. by S. Maekawa. - New York: Oxford University Press. - 2006. - 398 P.
- [23] Magnetic and transport percolation in diluted magnetic semiconductors / A. Kaminski, S. Das Sarma // *Phys. Rev. B.* - 2003. - V.68. - P.235210.
- [24] Polaron percolation in diluted magnetic semiconductors / A. Kaminski, S. Das Sarma // *Phys. Rev. Lett.* - 2002. - V.88, n.24. - P.247202.
- [25] Влияние концентрации примесей на люминесцентные свойства спиновых светоизлучающих диодов InGaAs/GaAs с  $\delta$ -слоем Mn / А.В. Рыков, М.В. Дорохин, Е.И. Малышева, и др. // *ФТП.* - 2016. - Т.50, В.1. - С.3-8.
- [26] Коренблит, И.Я. Ферромагнетизм неупорядоченных систем / И.Я. Коренблит, Е.Ф. Шендер // *УФН.* 1978. т.126. С.233-268.
- [27] Ферромагнитное воздействие  $\delta$ -<Mn>-слоя в GaAs барьере на спиновую поляризацию носителей в InGaAs/GaAs квантовой яме / С.В. Зайцев, М.В. Дорохин, А.С. Бричкин, и др. // *Письма в ЖЭТФ.* - 2009. - Т.90, в.10. - С.730-735

[28] Govorov, A.O. Optical properties of a semiconductor quantum dot with a single magnetic impurity: photoinduced spin orientation / A.O. Govorov, A.V. Kalameitsev // Phys. Rev. B. - 2005. - V.71. - P.035338.

[29] Tuning of the average p-d exchange in (Ga,Mn)As by modification of the Mn electronic structure / T. Hartmann, S. Ye, P.J. Klar, et.al. // Phys. Rev.B. - 2004. - V.70. - P.233201.

### **Список основных публикаций автора по теме диссертации:**

- [A1] 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 // Известия РАН. Серия физическая. - 2008. - Т. 72, вып.2. - С. 180-183.
- [A2] Применение лазерного распыления для получения полупроводниковых структур / Б.Н. Звонков, О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, Е.С. Демидов, П.Б. Демина, М.В. Дорохин, Ю.Н. Дроздов, В.В. Подольский, М.В. Сапожников // Оптич. Журнал. 2008. - Т.75, вып.6. - С.56-61.
- [A3] Emission properties of InGaAs/GaAs heterostructures with delta < Mn >-doped barrier / M.V. Dorokhin, Yu.A. Danilov, P.B. Demina, V.D. Kulakovskii, O.V. Vikhrova, S.V. Zaitsev, B.N. Zvonkov // J. of Phys. D-Appl. Phys. – 2008. – V. 41 – P. 24.
- [A4] Circularly polarized electroluminescence in LED heterostructures with InGaAs/GaAs quantum well and Mn d-layer / S.V. Zaitsev, M.V. Dorokhin, V.D. Kulakovskii, Yu.A. Danilov, P.B. Demina, M.V. Sapozhnikov, O.V. Vikhrova, B.N. Zvonkov // Physica E. - 2009. - V.41. - P.652-654.
- [A5] Излучательные свойства квантовых ям GaAs/InGaAs с GaAs барьером,  $\delta$ -легированным атомами Mn / О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, П.Б. Демина, М.В. Дорохин, Б.Н. Звонков, Ю.Н. Дроздов, М.В. Сапожников // Изв. РАН. Серия физическая. - 2009. - Т.73, вып.1. - С.14-17.
- [A6] Ферромагнетизм в GaAs структурах с дельта-легированным Mn слоем / О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, М.В. Дорохин, Б.Н. Звонков, И.Л. Калентьева, А.В. Кудрин // Письма в Журнал Технической Физики. – 2009. - Т.35, в.14. - С.8-17.
- [A7] Ферромагнитное воздействие  $\delta$ -<Mn>-слоя в GaAs барьере на спиновую поляризацию носителей в InGaAs/GaAs квантовой яме / С.В. Зайцев, М.В. Дорохин, А.С. Бричкин, О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, Б.Н. Звонков, В.Д. Кулаковский // Письма в ЖЭТФ. – 2009. – Т.90, в.10. – С.730-735.
- [A8] Electrical spin-injection and depolarization mechanisms in forward biased ferromagnetic Schottky diodes / S.V. Zaitsev, M.V. Dorokhin, P.B. Demina, N.V. Baidus, E.A. Uskova, B.N. Zvonkov // Phys. Status Solidi B, – Basic Solid State Physics. - 2009. – V.246, n.5. – P.1132-1137.
- [A9] Электролюминесценция квантово-размерных гетероструктур InGaAs/GaAs с ферромагнитными инжекторами вида (Al<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>)V и Ni / М.В. Дорохин, Ю.А. Данилов, А.В. Кудрин, О.В. Вихрова, М.М. Прокофьева // ФТП, 2010, Т. 44, вып. 11. С. 1447-1450.
- [A10] Инжекционная электролюминесценция в квантово-размерных структурах InGaAs/GaAs с контактом металл/полупроводник и металл/окисел/полупроводник / М.В. Дорохин, П.Б. Демина, Н.В. Байдусь, Ю.А. Данилов, Б.Н. Звонков, М.М. Прокофьева // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования.». 2010. - вып.5. - С.34-39.
- [A11] Температурная стабильность фотолюминесценции в гетероструктурах с InGaAs/GaAs квантовой ямой и акцепторным дельта< Mn >-слоем в GaAs барьере // М.В. Дорохин, Ю.А. Данилов, М.М. Прокофьева, А.Е. Шолина // ПЖТФ. - 2010. - Т.36, вып.17. - С.87-95

- [A12] Влияние параметров дельта<Mn>-легирования GaAs-барьера на циркулярно поляризованную люминесценцию гетероструктур GaAs/InGaAs / М.В. Дорохин, С.В. Зайцев, А.С. Бричкин, О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, Б.Н. Звонков, В.Д. Кулаковский, М.М. Прокофьева, А.Е. Шолина // ФТТ. – 2010. - Т.52, вып.11. - С. 2147-2152.
- [A13] Дорохин М.В., Измерение поляризационных характеристик излучения наногетероструктур / М.В. Дорохин, Ю.А. Данилов // Учебно-методическое пособие. 2010. <http://www.unn.ru/books/resources.html>
- [A14] Светодиоды на основе гетероструктур InGaAs/GaAs с магнитоуправляемой электролюминесценцией / А.В. Кудрин, М.В. Дорохин, Ю.А. Данилов, Е.И. Малышева // Письма в журнал технической физики. – 2011. – Т.37, в.24. – С.57-65.
- [A15] Фотолюминесцентный отклик квантовой ямы на изменение магнитного поля дельта-слоя Mn в гетероструктурах InGaAs/GaAs /А.И. Дмитриев, А.Д. Таланцев, С.В. Зайцев, Ю.А. Данилов, М.В. Дорохин, Б.Н. Звонков, О.В. Коплак, Р.Б. Моргунов // Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. – 2011. – Т.140, в.1(7). – С.158-169.
- [A16] Формирование спиновых светоизлучающих диодов на основе гетероструктур InGaAs/GaAs, содержащих ферромагнитные включения / М.М. Прокофьева, М.В. Дорохин, Ю.А. Данилов, Е.И. Малышева, А.В. Кудрин, И.Л. Калентьева, О.В. Вихрова, Б.Н. Звонков // Изв. РАН. Сер. Физ. – 2012. – Т.76, в.2. – С.255-258.
- [A17] Спиновые светоизлучающие диоды на основе гетероструктур с квантовой ямой GaAs/InGaAs/GaAs и ферромагнитным инжектирующим слоем GaMnSb / М.В. Дорохин, Е.И. Малышева, А.В. Здоровейщев, Ю.А. Данилов // Письма в журнал технической физики. – 2012. – Т.38, в.16. – С.69-77.
- [A18] Особенности формирования методом газофазной эпитаксии квантовых точек InAs/GaAs, легированных атомами Mn / М.В. Дорохин, А.В. Здоровейщев, Е.И. Малышева, Ю.А. Данилов, Б.Н. Звонков, А.Е. Шолина // Поверхность. Рентгеновские, синхронные и нейтронные исследования. - 2012. - вып.6. - С.55-58.
- [A19] Светоизлучающие диоды с ферромагнитным инжектирующим слоем на основе гетероструктур GaMnSb/InGaAs/ GaAs / М.В. Дорохин, Е.И. Малышева, А.В. Здоровейщев, Ю.А. Данилов, А.В. Кудрин // ФТП. – 2012. – Т.46, в.12. – С.1554-1560.
- [A20] Свойства гетероструктур MnSb/GaAs / О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, М.В. Дорохин, Ю.Н. Дроздов, Б.Н. Звонков, А.В. Здоровейщев. А.В. Кудрин, И.Л. Калентьева // Известия РАН. Сер. Физическая. – 2013. – Т.77, в.1. – С.79-81.
- [A21] Химический и фазовый состав спиновых светоизлучающих диодов GaMnAs/GaAs/InGaAs / Д.Е.Николичев, А.В.Боряков, С.Ю.Зубков, Р.Н.Крюков, М.В.Дорохин, А.В.Кудрин // ФТП. - 2014. - Т.48, вып.6. С.839-844.
- [A22] Влияние особенностей дизайна гетероструктур InGaAs/GaAs с магнитной примесью на их гальваномагнитные и излучательные свойства / И.Л. Калентьева, О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов,

М.В. Дорохин, Ю.Н. Дроздов, Б.Н. Звонков, А.В. Кудрин, П.А. Юнин // Известия РАН. Серия физическая. - 2014. - Т.78, вып.1. - С.24-29.

[A23] Структурное совершенство и распределение примеси в магнитных полупроводниковых наногетеросистемах на основе GaAs / А.И. Бобров, О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, М.В. Дорохин, Ю.Н. Дроздов, М.Н. Дроздов, Б.Н. Звонков, Н.В. Малехонова, Е.Д. Павлова // Известия РАН. Серия физическая. – 2014. – Т.78, №1. – С.18-21.

[A24] Эпитаксиальное выращивание слоев MnGa/GaAs для диодов со спиновой инжекцией / М.В. Дорохин, Д.А. Павлов, А.И. Бобров, Ю.А. Данилов, П.Б. Дёмина, Б.Н. Звонков, А.В. Здоровейщев, А.В. Кудрин, Н.В. Малехонова, Е.И. Малышева // Физика твердого тела. – 2014. – Т.56, В.10. – С.2062-2065.

[A25] Спиновая инжекция электронов в светоизлучающих диодах на основе структур GaMnAs/GaAs/InGaAs с туннельным переходом / М.В. Дорохин, Е.И. Малышева, Б.Н. Звонков, А.В. Здоровейщев, Ю.А. Данилов, Д.Е. Николичев, А.В. Боряков, С.Ю. Зубков // Журнал технической физики. – 2014. – Т.84, В.12. – С.102-106.

[A26] Effects of a nearby Mn delta layer on the optical properties of an InGaAs/GaAs quantum well / M.A.G. Balanta, M.J.S.P. Brasil, F. Iikawa, J.A. Brum, Udson, C. Mendes, Yu.A. Danilov, M.V. Dorokhin, O.V. Vikhrova, B.N. Zvonkov // Journal of Applied Physics. – 2014. – V.116. – P.203501.

[A27] Температурная зависимость циркулярной поляризации люминесценции спиновых светоизлучающих диодов на основе гетероструктур InGaAs/GaAs / М.В. Дорохин, Е.И. Малышева, Ю.А. Данилов, А.В. Здоровейщев, А.В. Рыков, Б.Н. Звонков // Поверхность. Рентгеновские, синхронные и нейтронные исследования. - 2014. - вып.5. - С.28-34.

[A28] Циркулярно-поляризованная электролюминесценция светоизлучающих диодов InGaAs/GaAs/(A III,Mn)BV на основе структур с туннельным барьером / Е.И. Малышева, М.В. Дорохин, М.В. Вельд, А.В. Кудрин, А.В. Здоровейщев // Физика и техника полупроводников. – 2015. – Т.49, В.11. – С.1497-1500.

[A29] Оптические и магнитотранспортные свойства структур InGaAs/GaAsSb/GaAs, легированных магнитной примесью / И.Л. Калентьева, Б.Н. Звонков, О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, П.Б. Демина, М.В. Дорохин, А.В. Здоровейщев // Физика и техника полупроводников. – 2015. – Т.49, В.11. – С.1478-1483.

[A30] Ферромагнитный инжектор CoPt в светоизлучающих диодах Шоттки на основе наноразмерных структур InGaAs/GaAs / А.В. Здоровейщев, М.В. Дорохин, П.Б. Демина, А.В. Кудрин, О.В. Вихрова, М.В. Вельд, Ю.А. Данилов, И.В. Ерофеева, Р.Н. Крюков, Д.Е. Николичев // Физика и техника полупроводников. – 2015. – Т.49, В.12. – С.1649-1653.

[A31] Применение кобальта в спиновых светоизлучающих диодах Шоттки с квантовыми ямами InGaAs/GaAs / Бобров А.И., Данилов Ю.А., Дорохин М.В., Здоровейщев А.В., Малехонова Н.В., Малышева Е.И., Павлов Д.А., Сайед С. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования.- 2015.- № 7.- С. 57-60.

[A32] The circular polarization inversion in  $\delta$ /InGaAs/GaAs light-emitting diodes / M.V. Dorokhin, Yu.A. Danilov, B.N. Zvonkov, M.A. Gonzalez Balanta, M.J.S.P. Brasil, F. Iikawa, U.C. Mendes, J.A. Brum, P.B. Demina, E.I. Malysheva, A.V. Zdoroveishev, A.V. Kudrin // *Applied Physics Letters*. – 2015. – V.107, N.4. – P.028531.

[A33] Влияние концентрации примесей на люминесцентные свойства спиновых светоизлучающих диодов InGaAs/GaAs с  $\delta$ -слоем Mn / А.В. Рыков, М.В. Дорохин, Е.И. Малышева, П.Б. Демина, О.В. Вихрова, А.В. Здоровейщев // *Физика и техника полупроводников*. – 2016. – Т.50, В.1. – С.3-8.

Подписано к печати 26.09.2016  
Формат 60×84/16 Авт. л. 2. Тираж 120 экз.  
Отпечатано в типографии «Оливер»  
г.Нижний Новгород, ул. Артельная д.15  
<http://www.olivernn.ru/>

