

Ведь Михаил Владиславович

**СПИНОВЫЕ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИЕ ДИОДЫ СО ВСТРОЕННЫМИ
СЛОЯМИ РАЗБАВЛЕННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ
(A^3, Mn) B^5 И $A^3B^5:Fe$**

Специальность 2.2.2. - Электронная компонентная база микро- и
наноэлектроники, квантовых устройств

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2022 г.

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Научный руководитель: **Дорохин Михаил Владимирович,**
доктор физико-математических наук, доцент,
ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Научно-исследовательский физико-технический институт, ведущий научный сотрудник

Официальные оппоненты: **Мармалюк Александр Анатольевич,**
доктор технических наук,
Акционерное общество «Научно-исследовательский институт «Полюс» имени М.Ф. Стельмаха», Научно-производственный комплекс «Разработка и производство изделий квантовой наноэлектроники», начальник научно-технического центра

Рябочкина Полина Анатольевна,
доктор физико-математических наук, профессор,
Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, кафедра фотоники Института физики и химии, профессор, и.о. зав. кафедрой

Ведущая организация: **Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта»**

Защита состоится «7» сентября 2022 г. в 16:00 на заседании диссертационного совета 24.2.340.01 при Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 3, ауд. 227 (конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке и на сайте Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского (<https://diss.unn.ru/1280>).

Автореферат разослан «___» июля 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.340.01,
кандидат физико-математических наук

Марычев Михаил Олегович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Одним из актуальных направлений развития современной оптоэлектроники и спинтроники является создание источников циркулярно-поляризованного излучения, позволяющее реализовать новые физические принципы передачи информации посредством использования дополнительной степени свободы - поляризации оптического излучения [1,2]. Это необходимо для увеличения пропускной способности существующих волоконно-оптических линий и линий дальней космической связи, а также для передачи дополнительной криптографической информации. Принцип работы источников циркулярно-поляризованного света (так называемых спиновых светоизлучающих диодов) обеспечивает совместимость с существующими элементами оптоэлектроники (волноводами, источниками питания, приёмниками) при незначительной модернизации технологического процесса. Кроме того, спиновые светодиоды имеют ряд преимуществ над классическими светодиодами, в частности, возможность независимой передачи сигнала по одному и тому же каналу путём модуляции интенсивности и/или степени циркулярной поляризации [1,2].

Основным элементом спинового светоизлучающего диода (ССИД) является ферромагнитный (ФМ) слой, обеспечивающий управление спиновой поляризацией носителей заряда в полупроводниковых структурах. Излучательная рекомбинация с участием спин-поляризованных носителей обуславливает циркулярно-поляризованную люминесценцию [3]. В большинстве существующих схем [1-3] структура спиновых светоизлучающих диодов совпадает с типовой структурой светоизлучающих диодов, отличия заключаются в типе контакта к полупроводниковым слоям излучающей структуры (который выполняется на основе ферромагнитного инжектора) и приповерхностной контактной области. Исключение составляют ССИД, в

которых поляризация носителей заряда по спину осуществляется непосредственно в активной области за счёт взаимодействия с близкорасположенным ферромагнитным слоем [4].

Изначально ферромагнитные металлы рассматривались как основной материал для использования в структурах со спиновой инжекцией [5]. Однако, известные достижения по созданию спиновых светоизлучающих диодов с ФМ металлами не получили должного развития. Основные причины, на наш взгляд, — это необходимость применения сложных и дорогостоящих технологий получения спиновых ССИД с ферромагнитным металлом, а также специфические требования к легированию полупроводниковой структуры для обеспечения наибольшей спиновой инжекции.

Альтернативным видом ферромагнитного слоя для интеграции в спиновые светоизлучающие диоды являются разбавленные магнитные полупроводники (РМП). Эти материалы представляют собой полупроводниковые соединения, легированные атомами переходных элементов. Для получения подобных слоёв могут быть использованы существующие методы полупроводниковой технологии, таким образом, не требуется значительной модификации технологических процессов. По существу, требуется лишь разработать либо оптимизировать нужный способ легирования полупроводников.

Наиболее значимым ограничением для практического использования РМП в приборах спинтроники является низкое значение температуры Кюри. На сегодняшний день, наиболее изученным и развитым является разбавленный магнитный полупроводник $(\text{Ga},\text{Mn})\text{As}$ [1,3]. Повышенный интерес именно к $(\text{Ga},\text{Mn})\text{As}$ объясняется тем, что он традиционно считался основным и эталонным разбавленным магнитным полупроводником. Наибольшая температура Кюри, полученная для однородно легированного РМП $(\text{Ga},\text{Mn})\text{As}$ составляет 190 К [6], работающего при комнатной температуре прибора

спинтроники с использованием слоёв разбавленного магнитного полупроводника получено не было.

На сегодняшний день существует две современные мировые тенденции дальнейшего развития технологии разбавленных магнитных полупроводников:

- пост-ростовая обработка (чаще всего речь идёт о различных вариантах отжига). Например, для $(\text{Ga,Mn})\text{As}$ именно низкотемпературный отжиг позволил получить слои с температурой Кюри равной 190 К;

- синтез новых материалов. В 2015 году в работе [7] синтезированы слои $(\text{Ga,Fe})\text{Sb}$, для которых было продемонстрировано наличие ферромагнитных свойств при температуре 300 К. В 2017 году в группе автора работы впервые в мире были сформированы слои $(\text{In,Fe})\text{Sb}$, с температурой Кюри превышающей 300К [8]. В 2020 году стало известно о создании слоёв GaAs, легированных атомами Fe, в которых также наблюдается ферромагнетизм при комнатной температуре [9].

Таким образом, технология разбавленных магнитных полупроводников вышла на новый уровень развития, следующим шагом которого станет построение приборов на их основе, но уже работающих при 300 К. На текущий момент это главная задача физики и технологии РМП. Решение этой задачи не только повысит интерес к тематике разбавленных магнитных полупроводников, но и приблизит практическое применение приборов спинтроники за счёт создания воспроизводимой технологии источников циркулярно-поляризованной электролюминесценции.

В настоящей работе экспериментально реализованы и изучены оба указанных выше подхода к развитию технологии РМП, сформированы приборы спинтроники, содержащие слои разбавленных магнитных полупроводников, исследованы их свойства, впервые показана возможность работы таких приборов при комнатной температуре.

Цели и задачи работы

Целью работы являлось интеграции новых магнитных материалов разбавленного магнитного полупроводника в структуру спинового светоизлучающего диода, а также совершенствование технологии получения спиновых светоизлучающих диодов, содержащих слои РМП, за счёт использования пост-ростовых обработок.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи работы:

1. Интеграция слоёв разбавленных магнитных полупроводников $(A^3, Mn)B^5$ и $A^3B^5:Fe$ как источников спин-поляризованного тока носителей заряда в структуру спинового светоизлучающего диода;
2. Модификация структуры спиновых светоизлучающих диодов с инжектором в виде РМП для повышения рабочей температуры до значения 300 К.
3. Исследование механизмов токопереноса в гетеропереходах, включающих разбавленный магнитный полупроводник на основе InSb ((In,Fe)Sb/GaAs).
4. Исследование спиновой инжекции из намагниченного слоя $A^3B^5:Fe$ в GaAs путём измерения циркулярно-поляризованной электролюминесценции сформированных спиновых светоизлучающих диодов.

Научная новизна работы

1) Впервые сформированы спиновые светоизлучающие диоды с ферромагнитным слоем $(Ga, Mn)As$, полученным методом импульсного лазерного осаждения с последующим пост-ростовым импульсным лазерным отжигом. Показана возможность повышения рабочей температуры ССИД по сравнению с диодами без проведения пост-ростовой обработки. Полученное значение рабочей температуры соответствует таковому для аналогичных диодных структур, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

2) Для слоёв разбавленных магнитных полупроводников A^3B^5 , легированных атомами Fe, впервые были сформированы приборные структуры (диоды), использующие эти слои в качестве эмиттера спин-поляризованных носителей заряда.

3) Впервые исследованы механизмы токопереноса в структурах $A^3B^5:Fe/n-GaAs$ и $A^3B^5:Fe/p-GaAs$ ($A^3=In, Ga$; $B^5=As, Sb$). Продемонстрирована спиновая инжекция из намагниченных слоёв A^3B^5 , легированных Fe, в активную область светоизлучающей диодной структуры.

4) Впервые получена циркулярно-поляризованная электролюминесценция в спиновых светодиодах с инжектором в виде разбавленного магнитного полупроводника $A^3B^5:Fe$ при комнатной температуре.

Практическая значимость работы

1) Разработаны лабораторные образцы светоизлучающих диодов, содержащих слои разбавленного магнитного полупроводника, испускающих частично циркулярно-поляризованный свет, и имеющих рабочую температуру вплоть до 300 К.

2) Изучены диодные свойства в структурах с разбавленным магнитным полупроводником $A^3B^5:Fe$, указаны способы интеграции таких слоёв в оптоэлектронные приборы на основе слоёв GaAs n- и p- типа проводимости.

3) Показана возможность применения метода импульсного лазерного отжига для модификации поверхностных слоёв спиновых светодиодов. Установлены режимы, обеспечивающие повышение температуры Кюри $(Ga,Mn)As$, но не оказывающие существенного влияния на активную область спинового светоизлучающего диода.

Положения, выносимые на защиту

1. Отжиг поверхности структур спинового светоизлучающего диода $(Ga,Mn)As/GaAs/InGaAs$ импульсным наносекундным лазером приводит к увеличению температуры Кюри слоя $(Ga,Mn)As$ и, соответственно, увеличению

рабочей температуры спиновых светодиодов с 30 К для исходной структуры до 120 К.

2. Механизмы инжекции основных и неосновных носителей заряда в структурах (In,Fe)Sb/n-GaAs и (In,Fe)Sb/p-GaAs подобны таковым в диодах с барьером Шоттки. В частности, в структурах (In,Fe)Sb/GaAs/InGaAs реализуется инжекция неосновных носителей и генерация электролюминесценции.

3. Нанесение слоя (In,Fe)Sb на поверхность GaAs структур методом импульсного лазерного осаждения не вносит каких-либо дополнительных дефектов в приповерхностную область GaAs, но приводит к образованию заряженных состояний на границе раздела (In,Fe)Sb/GaAs. Нанесение тонкого защитного слоя MgO между ферромагнитным инжектором (In,Fe)Sb и светоизлучающей структурой минимизирует это воздействие.

4. В гетероструктурах (In,Fe)Sb/GaAs/InGaAs и GaAs:Fe/GaAs/InGaAs осуществляется электрическая инжекция спин-поляризованных носителей заряда из намагниченного слоя разбавленного магнитного полупроводника в активную область спинового светоизлучающего диода, что обуславливает генерацию циркулярно-поляризованной электролюминесценции. Высокие значения температуры Кюри слоёв (In,Fe)Sb и GaAs:Fe (более 300 К) обеспечивают регистрацию циркулярной поляризации при комнатной температуре.

Достоверность результатов

Достоверность результатов в экспериментальной части работы обеспечена использованием взаимодополняющих методов анализа, воспроизводимостью характеристик исследуемых объектов, многократной экспериментальной проверкой результатов измерений, использованием метрологически аттестованного измерительного оборудования. Комплексный подход к изучению спиновых светодиодов с использованием электротранспортных,

магнитных, магнитооптических измерений обеспечивает надежность проведенных исследований.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на международных симпозиумах «Нанопластика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, 2016-2021 гг.); уральской международной зимней школы по физике полупроводников (Екатеринбург, 2016 г.); международной научно-технической конференции «Квантовая электроника» (Минск, 2017 г.); международных школах и конференциях по оптоэлектронике, фотонике и наноструктурам «SPBOpen» (Санкт-Петербург, 2017-2021 гг.), всероссийских молодежных конференциях по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Санкт-Петербург, 2016-2021 гг.); всероссийской молодежной школе-семинаре «Диагностика наноматериалов и наноструктур» (Рязань, 2013г.); всероссийской научной конференции молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» (Саратов, 2018); международном симпозиуме «The Joint European Magnetic Symposia» (Уппсала, Швеция, 2019 г.); международных конференциях «International Baltic Conference on Magnetism» (Калининград, 2019, 2021 г.); а также на семинарах физического факультета и НИФТИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского. По результатам докладов по теме работы получено 5 дипломов различной степени.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано более 30 научных работ, включая 8 статей, входящих в перечень ВАК.

Личный вклад автора

Автором внесён определяющий вклад в получение основных экспериментальных результатов. Исследования фото- и электролюминесценции, а также вольтамперных характеристик проведены

автором самостоятельно. Исследования магнитопольевых зависимостей циркулярной поляризации электролюминесценции проведены автором самостоятельно и совместно с П. Б. Дёминой и с Е. И. Малышевой (НИФТИ ННГУ). Постановка экспериментов и обсуждение результатов выполнены совместно с научным руководителем работы. Постановка ряда экспериментов и обсуждение результатов по импульсному лазерному отжигу проведены совместно с Ю.А. Даниловым (НИФТИ ННГУ). Подбор технологических параметров формирования РМП $A^3B^5:Fe$ происходил совместно с А.В. Кудриным (ННГУ). Выращивание структур проводилось Б. Н. Звонковым и В. П. Лесниковым (НИФТИ ННГУ) при участии автора работы. Исследования структур методом просвечивающей электронной микроскопии выполнены группой зав. каф. ФПЭН ННГУ Д. А. Павлова. Исследования структур методом атомно-силовой микроскопии выполнены Р. Н. Крюковым (ННГУ). Отжиги структур импульсным лазером выполнены А. Е. Парафиным (ИФМ РАН) при участии автора работы.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы. Общий объём диссертации составляет 126 страницы, включая 38 рисунков. Список цитируемой литературы содержит 157 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит актуальность исследований, цель и задачи работы, в соответствии с которыми проводились исследования, а также обоснование научной новизны и практической значимости. Представлены сведения об апробации работы, достоверности результатов, личном вкладе автора диссертации, публикациях, информация о структуре и объеме диссертации. В введении также изложены положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** диссертации представлена информация о базовых принципах спинтроники, а также о текущем состоянии исследований в области физики и технологии разбавленных магнитных полупроводников. Описаны способы создания спиновой поляризации в полупроводниковых материалах, в частности: внесение в магнитное поле, облучение циркулярно-поляризованным светом, спиновая инжекция из ферромагнитных материалов, спиновый эффект Холла и спиновая поляризация носителей за счёт взаимодействия с близко расположенным ферромагнитным слоем.

Приведено описание спинового светоизлучающего диода, являющегося базовым элементом спинтроники, а также его основных функциональных элементов и возможных геометрий построения. Рассмотрены возможные материалы для использования в качестве инжектора спин-поляризованных носителей в спиновом светоизлучающем диоде: ферромагнитные металлы, полуметаллические соединения и разбавленные магнитные полупроводники.

Более подробно описаны разбавленные магнитные полупроводники, поскольку именно они используются в качестве спинового инжектора в данной работе. В частности, рассмотрены РМП, содержащие атомы Mn и Fe. Проведён обзор различных теорий, объясняющих магнитное упорядочение в разбавленных магнитных полупроводниках, легированных атомами Mn и Fe. Также в главе описаны возможные методы получения РМП: молекулярно-лучевая эпитаксия, импульсное лазерное осаждение, ионная имплантация с последующим отжигом.

Рассмотрены основные способы интеграции разбавленных магнитных полупроводников в спиновые светоизлучающие диоды. В частности, описаны два основных метода получения спиновых светоизлучающих диодов со встроенными слоями РМП: молекулярно-лучевая эпитаксия и МОС-гидридная эпитаксия (МОСГЭ), совмещённая с импульсным лазерным осаждением. Рассмотрены основные достоинства и недостатки этих методов.

Во **второй главе** представлено описание методик формирования структур, исследуемых в ходе данной работы. Структуры с инжектором в виде $(\text{Ga},\text{Mn})\text{As}$ были сформированы комбинированным методом, объединяющим МОС-гидридную эпитаксию и импульсное лазерное осаждение в едином реакторе. Для формирования полупроводниковой части исследуемых структур методом МОСГЭ были использованы металлоорганические соединения (триметилгаллий и триметилиндий) – в качестве источников материалов III группы, а также арсин – в качестве элемента V группы. Газом носителем является водород, который переносит частицы осаждаемых веществ к подложке.

Для выращивания РМП $(\text{Ga},\text{Mn})\text{As}$ в реакторе МОС-гидридной эпитаксии импульсным Nd:YAG лазером распылялись твердотельные мишени Mn и GaAs. Распылённые частицы Mn и GaAs переносились газом-носителем в сторону подложки, где формировались слои $(\text{Ga},\text{Mn})\text{As}$. Ранее было показано, что подобный подход позволяет формировать спиновые светоизлучающие диоды с рабочей температурой вблизи 30 К, что соответствует температуре Кюри сформированного методом лазерного осаждения $(\text{Ga},\text{Mn})\text{As}$ [10]. Под рабочей температурой подразумевается температура измерений, при которой сохраняется компонента циркулярной поляризации, обусловленная инжекцией спин-поляризованных электронов.

В рамках настоящей работы для увеличения рабочей температуры ССИД с инжектором $(\text{Ga},\text{Mn})\text{As}$ впервые было предложено использование метода импульсного лазерного отжига. Отжиг выполнен с использованием эксимерного лазера LPX-200, имеющего длину волны 248 нм, длительность импульса ~ 30 нс и плотность энергии на импульс до 290 мДж/см². Лазерный отжиг проводился в Институте Физики Микроструктур РАН совместно с н.с. Парафиным Алексеем Евгеньевичем.

Для спиновых светоизлучающих диодов с инжекторами $\text{A}^3\text{B}^5:\text{Fe}$ использовался альтернативный технологический подход. Полупроводниковая

часть структур также была выращена комбинированным методом, объединяющим МОС-гидридную эпитаксию и импульсное лазерное осаждение. Ферромагнитный инжектор, представляющий собой РМП $A^3B^5:Fe$, формировался методом импульсного лазерного осаждения в высоком вакууме. Были использованы составные мишени $InSb/Fe$ и $GaAs/Fe$, распыляемые $Nd:YAG$ импульсным лазером.

Также во второй главе приведено описание методик исследования, применявшиеся в работе: атомно-силовая микроскопия, измерения магнитолевых зависимостей эффекта Холла и слоевого сопротивления $(Ga,Mn)As$, измерения вольтамперных характеристик, измерения фото- и электролюминесценции, а также циркулярной поляризации электролюминесценции.

В третьей главе приведены исследования спиновых светоизлучающих диодов с инжектором $(Ga,Mn)As$, модифицированных импульсным лазерным отжигом.

Методом МОС-гидридной эпитаксии, совмещённой с импульсным лазерным осаждением в едином технологическом цикле, было изготовлено два типа структур. Образцы серии M1 были изготовлены для проведения измерений электролюминесценции и циркулярной поляризации электролюминесценции. Для их изготовления на подложке $p-GaAs$ методом МОСГЭ последовательно выращивались следующие слои при температуре $600^\circ C$: буферный слой $p-GaAs$, квантовая яма $In_{0,2}Ga_{0,8}As:C$ (концентрация дырок составила $p \approx 8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, ширина $d_{QW} = 16 \text{ нм}$), слой $n-GaAs$ толщиной 90 нм с градиентным легированием (область с высокой степенью легирования n^{++} ($n \approx 10^{19} \text{ см}^{-3}$) имеет толщину 30 нм). Затем был сформирован слой ферромагнитного инжектора $(Ga,Mn)As$ толщиной 90 нм при пониженной температуре $340^\circ C$ методом ИЛО распылением мишеней Mn и $GaAs$. В настоящей работе использовались схема легирования структуры, а также

параметры слоя (Ga,Mn)As, обеспечивающие наибольшие значения степени циркулярной поляризации, которые были установлены ранее [10].

Образцы серии M2 были выращены для изучения магнитных свойств путём гальваномагнитных измерений и представляли собой слои (Ga,Mn)As, сформированные методом импульсного лазерного осаждения по вышеописанной технологии на подложке *i*-GaAs. Схематическое представление образцов обеих серий показано на рисунке 1.

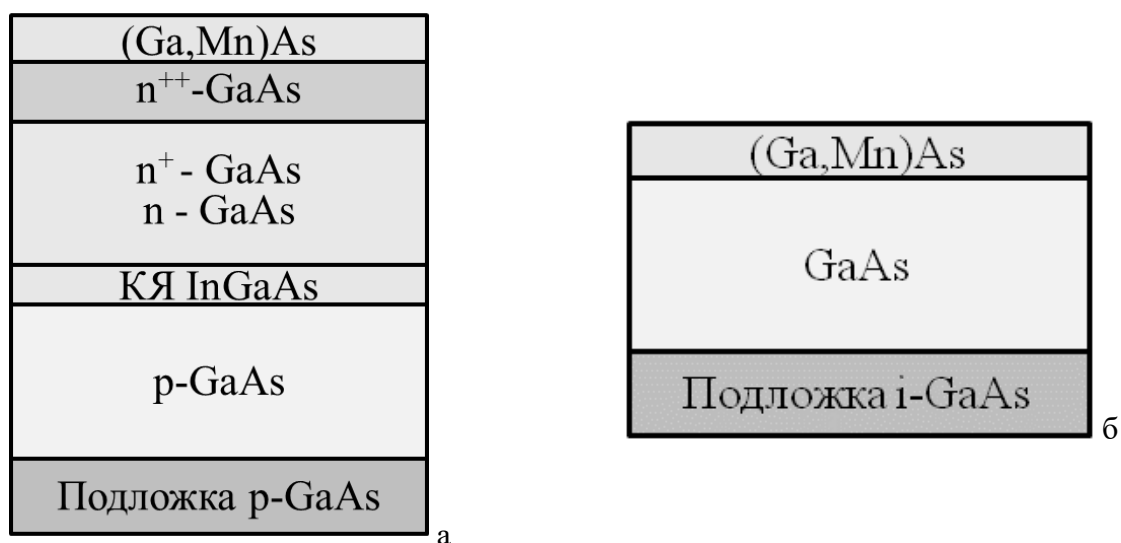


Рисунок 1. Схемы исследуемых структур: (а) – полупроводниковая часть светоизлучающих диодов (Ga,Mn)As/ n^{++} GaAs/ n -GaAs/InGaAs на подложке *p*-GaAs (образцы M1), (б) – образцы M2 на подложке *i*-GaAs.

По завершению процесса эпитаксии сформированные образцы M1 и M2 извлекались из реактора и разделялись на несколько частей. Часть структур была подвергнута пост-ростовому импульсному лазерному отжигу с энергиями 160, 260 и 290 мДж/см².

На заключительном этапе формирования образцов серии M1 на поверхность (Ga,Mn)As были нанесены Au омические контакты, изготовлены меза-структуры диаметром 500 мкм и сформированы In омические контакты к подложке.

Исследования топографии поверхности как неотожжённой, так и отожжённых импульсным лазером структур показали, что воздействие лазерного пучка является неоднородным по площади. По этой причине для изучения магнитных свойств и для формирования спиновых светоизлучающих диодов выбирались участки, расположенные в центральной части образцов.

На рисунке 2 показаны зависимости сопротивления слоя (Ga,Mn)As от приложенного магнитного поля, измеренные в диапазоне температур 13–80 К, для исходных образцов серии M2 и для образцов, отожжённых лазерным пучком с плотностью энергии 290 мДж/см².

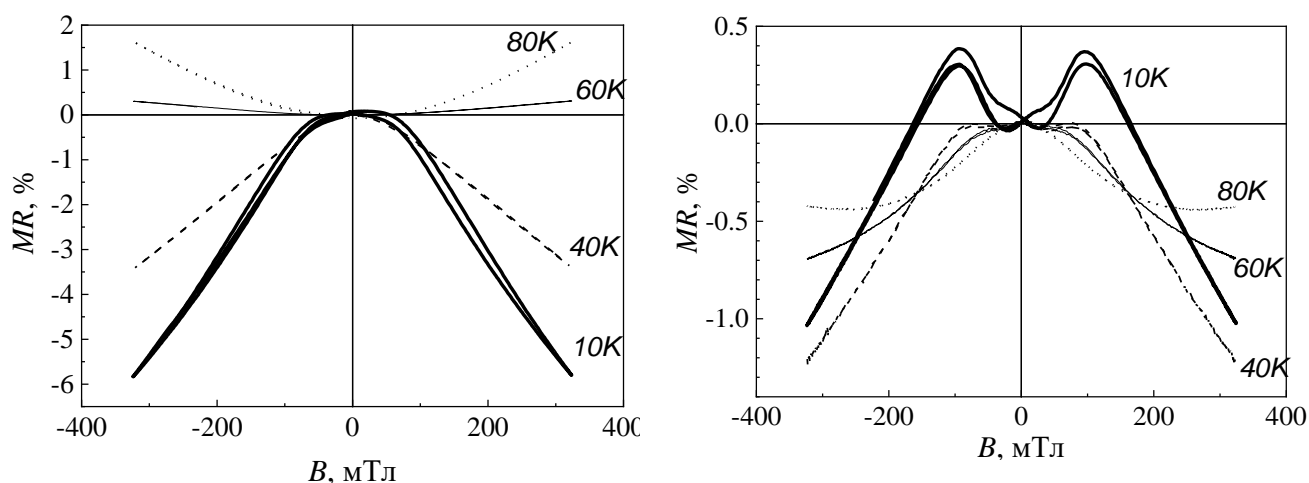


Рис. 2. Магнитополевые зависимости слоевого сопротивления исходных образцов (слева) и отожжённых с плотностью энергии 290 мДж/см² (справа) серии M2.

На основании полученных данных можно приблизительно оценить температуру Кюри слоя (Ga,Mn)As в этих образцах: 40К без воздействия отжига и 80К после лазерного отжига.

На структурах серии M1 были выполнены исследования циркулярно-поляризованной электролюминесценции спиновых светоизлучающих диодов с инжектором (Ga,Mn)As, как неотожжённых, так и отожжённых импульсным лазером. Значение степени циркулярной поляризации ЭЛ рассчитывается в соответствии с соотношением:

$$P_{EL} = \frac{I(\sigma^+) - I(\sigma^-)}{I(\sigma^+) + I(\sigma^-)}, \quad (1)$$

где P_{EL} – степень циркулярной поляризации ЭЛ, величины $I(\sigma^+)$ ($I(\sigma^-)$) соответствуют интенсивностям, записанным в σ^+ (σ^-) поляризациях.

Стоит отметить общую тенденцию увеличения степени циркулярной поляризации электролюминесценции образцов после лазерного отжига при прочих равных условиях. Так, при температуре 10 К для исходных диодов серии М1 величина P_{EL} достигает значения $\sim 0,3\%$, а в случае отожженных диодов серии М2 величина P_{EL} составила значение $\sim 0,6\%$.

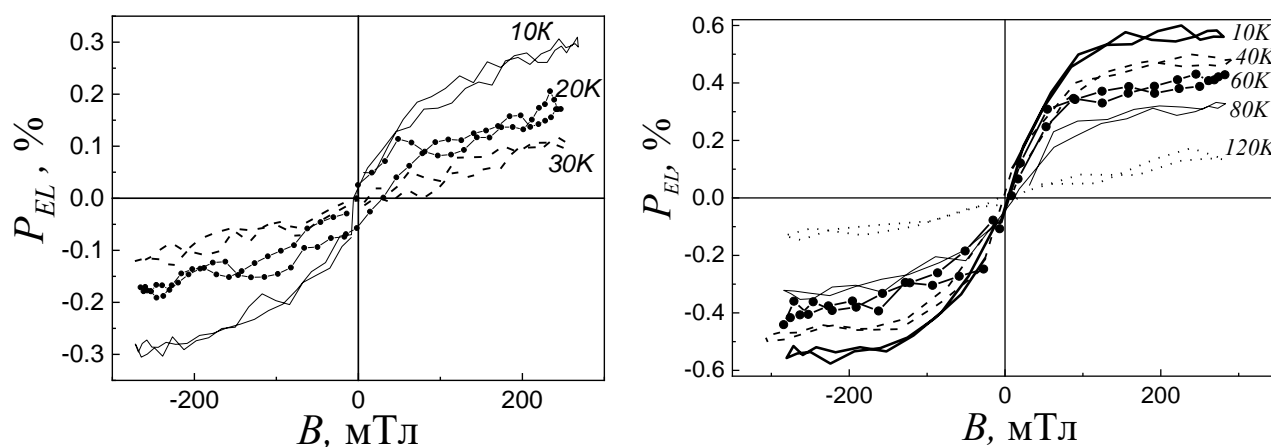


Рис. 3. Магнитопольевые зависимости степени циркулярной поляризации электролюминесценции исходных образцов (слева) и отожжённых с плотностью энергии 260 мДж/см^2 (справа) серии М1. Зависимости измерены в диапазоне температур 10-120 К при токе диода 10 мА.

Повышение диапазона рабочих температур спиновых светодиодов на основе структур, подвергнутых лазерному отжигу, предположительно, связано с повышением температуры Кюри ферромагнитного инжектора $(\text{Ga},\text{Mn})\text{As}$. Исходя из результатов измерений степени циркулярной поляризации электролюминесценции, точка Кюри для слоя разбавленного магнитного полупроводника после отжига достигает 120 К, что соответствует значениям

для слоев (Ga,Mn)As, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии [11].

Таким образом, в данной главе приведены исследования по воздействию импульсного лазерного отжига на поверхность гетероструктур, содержащих слои (Ga,Mn)As. Показано, что импульсный лазерный отжиг может быть использован в качестве нового способа повышения рабочей температуры спиновых светоизлучающих диодов, в которых источником спин-поляризованных носителей является слой (Ga,Mn)As. Проведённые гальваномагнитные измерения и измерения циркулярно-поляризованной электролюминесценции изготовленных спиновых светодиодов показали, что лазерный отжиг приводит к увеличению температуры Кюри слоя (Ga,Mn)As и, соответственно, увеличению рабочей температуры спиновых светодиодов до ~ 120 К, в то время как эта величина для спиновых светодиодов с неотожжённым (Ga,Mn)As инжектором составляет 30 К. Наблюдаемый эффект является следствием воздействия импульсного лазерного излучения на структуру слоя (Ga,Mn)As: в соответствии с детальным исследованием, выполненным в работе [12], атомы Mn перестраиваются и замещают атомы Ga, а также повышается концентрация дырок. Полученные значения температуры Кюри соответствуют аналогичным показателям для структур, сформированных методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

В **четвёртой главе** показывается возможность использования разбавленных магнитных полупроводников $A^3B^5:Fe$ в качестве функционального слоя в приборной структуре, а именно в качестве ферромагнитного инжектора в спиновом светоизлучающем диоде.

В начальной части главы 4 описано исследование возможных механизмов токопереноса в гетероструктурах (In,Fe)Sb/GaAs/InGaAs. Структуры были выращены на подложках n^+ -GaAs (серия образцов F1) и p^+ -GaAs (серия образцов F2) в несколько этапов: на первом этапе роста методом МОСГЭ при

температуре 600°C в атмосфере водорода формировались следующие слои: буферный слой n-GaAs (образцы F1) или p-GaAs (образцы F2), 10 нм квантовая яма $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$, 20 нм слой нелегированного GaAs. Уровень как донорного, так и акцепторного легирования буферного слоя составил $6\text{-}8\cdot 10^{16}\text{ см}^{-3}$. На втором этапе роста структур методом импульсного лазерного осаждения в вакууме из составной мишени InSb/Fe при температуре 250°C был сформирован инжектор (In,Fe)Sb толщиной ~ 40 нм, содержание Fe составило ~ 10 ат. %. Общая схема исследуемых структур представлена на рис. 4. На заключительном этапе формирования диода на поверхность (In,Fe)Sb были нанесены омические контакты и изготовлены меза-структуры.

РМП (In,Fe)Sb
GaAs
Квантовая яма InGaAs
Буферный слой n-GaAs (F1)/p-GaAs (F2)
Подложка n-GaAs (F1)/p-GaAs (F2)

Рисунок 4. Общая схема структур для исследования механизмов токопереноса в гетероструктурах (In,Fe)Sb/GaAs/InGaAs.

Аналогично были сформированы контрольные образцы диодов Шоттки, на основе той же конструкции полупроводниковой структуры, но не содержащие слоя (In,Fe)Sb. Для контрольных структур на основе полупроводника n-типа формировался контакт Шоттки Au/GaAs (Au1), для p-типа использован контакт Шоттки Al/GaAs (Al1).

На сформированных диодах были измерены вольтамперные характеристики (рисунок 5). Проведенные ранее исследования показали, что слой (In,Fe)Sb обладает электронным типом проводимости [8].

Экспериментальные кривые, полученные при температуре 300 К, были сопоставлены с ВАХ, рассчитанными по формуле:

$$I = I_0 \cdot \left(\exp \left(\frac{|q| \cdot U}{n \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right), \quad (2)$$

где I_0 – ток насыщения, q – заряд электрона, n – коэффициент неидеальности, k – постоянная Больцмана, T – температура.

Качественно ВАХ исследуемых образцов из серий F1 и F2 и контрольных образцов Au1 и Al1 подобны. Кроме того, участок экспоненциального роста экспериментально-полученных кривых хорошо согласуется с таковыми, рассчитанными по формуле (2) (кривые Т на рисунке 5). Коэффициент неидеальности n для обоих видов структур при температуре 300 К был равен 1, что соответствует термоэмиссионному механизму протекания тока.

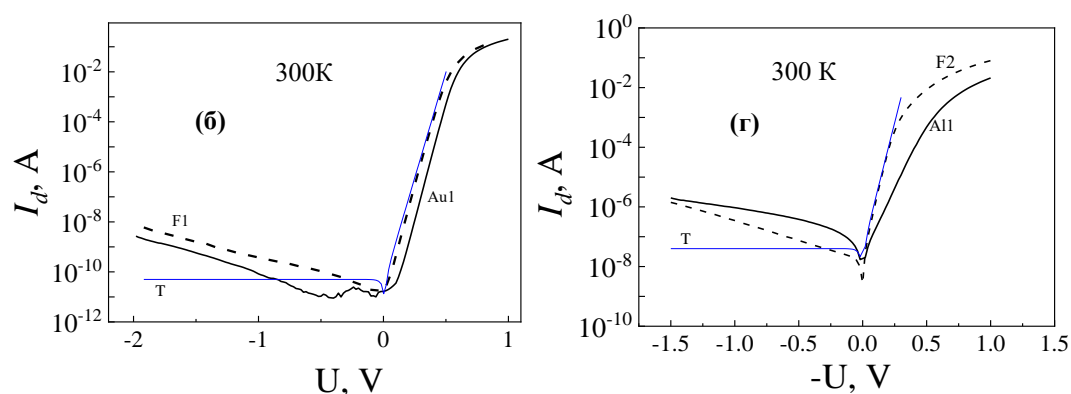


Рисунок 5. Вольтамперные характеристики, измеренных при температуре 300 К: б) образцов F1 и Au1,; г) образцов F2 и Al1. Буквой Т обозначены ВАХ, рассчитанные по формуле (2).

Подобие вольтамперных характеристик контрольных и исследуемых структур, а также расчётных кривых (формула (2)), позволяет сделать вывод о подобии механизмов токопереноса, т.е. протекание тока в структурах с гетеропереходом (In,Fe)Sb/GaAs происходит по механизму, аналогичному протеканию тока в контрольных структурах с барьером Шоттки и определяется зонной структурой гетеропереходов. Небольшие качественные различия

полученных ВАХ для исследуемых и контрольных структур связаны с различиями в формировании разрывов зон и потенциальных барьеров для случая барьера Шоттки и гетероперехода вида InSb/GaAs, дефектообразования на гетерогранице при нанесении слоёв.

Для сформированных диодных структур выполнено исследование влияния нанесения слоя (In,Fe)Sb методом импульсного лазерного осаждения на люминесцентные свойства спинового светодиода. Для этого на основе гетероструктур с квантовыми ямами InGaAs/GaAs были сформированы три серии образцов: образцы серии F3 – спиновые светодиоды с инжектором (In,Fe)Sb и защитным слоем MgO (использование MgO в качестве защитного слоя обусловлено возможностью сохранения ориентирующих свойств подложки GaAs в структурах GaAs/MgO/(In,Fe)Sb [13]); образцы серии F4 – спиновые светодиоды с инжектором (In,Fe)Sb и без защитного слоя; образцы серии N – исходная светоизлучающая структура без контактов. Схематическое изображение образцов приведено на рисунке 6.

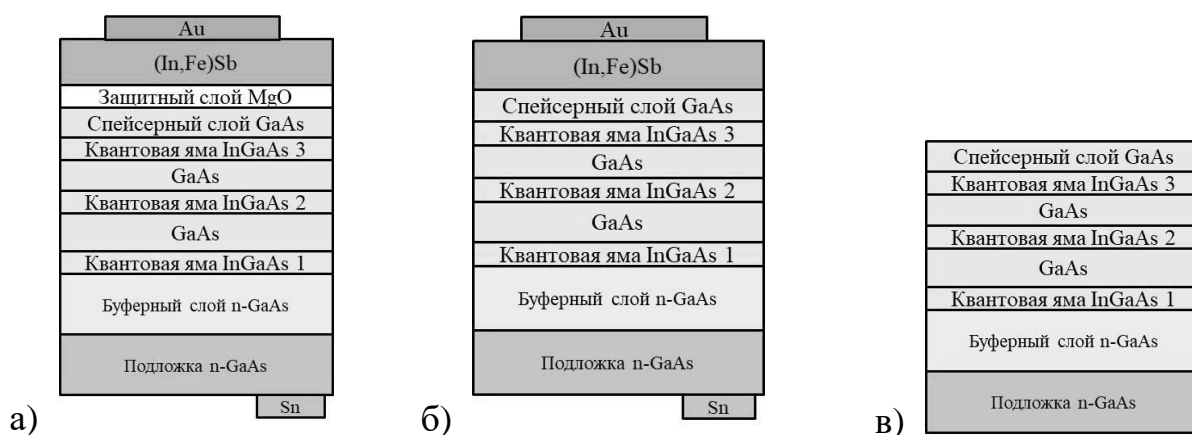


Рисунок 6. Схема исследуемых структур (а – спиновый светодиод с инжектором (In,Fe)Sb и защитным слоем MgO (образцы F3), б – спиновый светодиод с инжектором (In,Fe)Sb и без защитного слоя (образцы F4), в – исходная светоизлучающая структура без контактов (образцы N)).

Были измерены спектры фотолюминесценции (ФЛ) для образцов серий F3, F4 и N (для образцов F3 и F4 перед измерением фотолюминесценции слой Au и (In,Fe)Sb были химически удалены). На диодах с инжектором (In,Fe)Sb (образцы F3 и F4) измерялись спектры электролюминесценции. Спектры ФЛ и ЭЛ представлены на рисунках 7 и 8 соответственно.

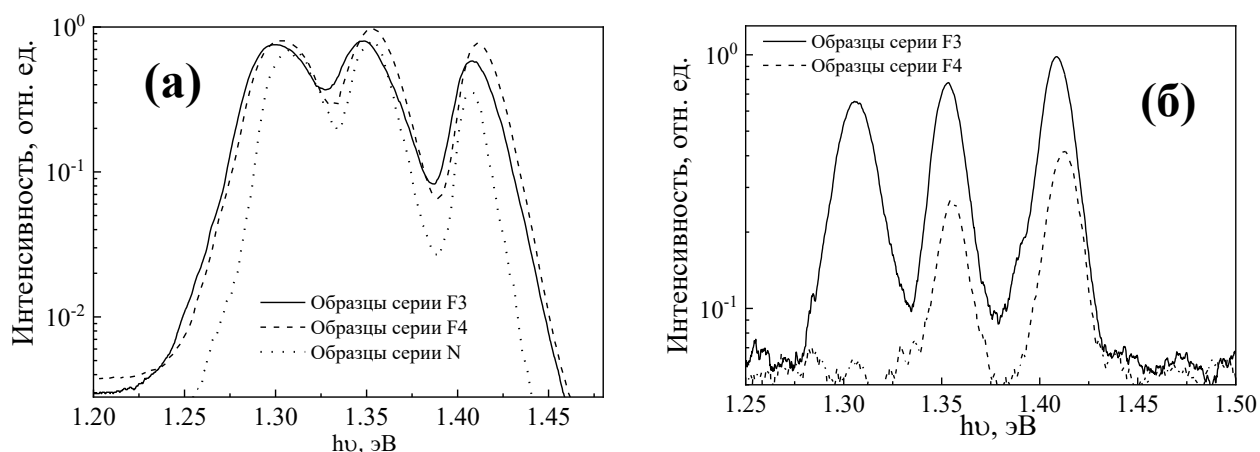


Рисунок 7. Спектры (а) фотолюминесценции исследуемых образцов (накачка производилась He-Ne-лазером мощностью 70 мВт, температура измерений – 77К); (б) электролюминесценции исследуемых образцов F3 и F4 (ток диодов – 100мА, температура измерений – 77К).

Обнаружено, что нанесение слоя (In,Fe)Sb методом импульсного лазерного осаждения на спейсерный слой GaAs не оказывает влияния на квантовую яму, расположенную на минимальном удалении от поверхности, что следует из сохранения интенсивности **фотолюминесценции** ближайшей к поверхности квантовой ямы (рисунок 7а). При этом на спектрах **электролюминесценции** зарегистрировано существенное гашение интенсивности ближайшей к поверхности квантовой ямы. Последнее позволяет заключить, что слой (In,Fe)Sb влияет на свойства гетерограницы (In,Fe)Sb/GaAs. Осаждение защитного слоя MgO между GaAs и (In,Fe)Sb позволяет минимизировать это влияние (гашения интенсивности ЭЛ не зарегистрировано).

Также были рассмотрены гетероструктуры GaAs:Fe/GaAs. Было показано, что для данного вида контактов формируется структура аналогичная диоду с p-n переходом, в которой слой GaAs:Fe играет роль материала n-типа проводимости.

С учётом выявленных механизмов токопереноса были сформированы и исследованы спиновые светоизлучающие диоды на основе гетероструктуры GaAs/InGaAs с ферромагнитными инжекторами в виде разбавленных магнитных полупроводников (In,Fe)Sb и GaAs:Fe, а также разработаны методы увеличения интенсивности электролюминесценции путем модификации границы раздела ферромагнетик/полупроводник. В частности, исследуемые ССИД были сформированы на основе гетероструктур с КЯ InGaAs/GaAs с ферромагнитными инжекторами в виде РМП (In,Fe)Sb и GaAs:Fe и защитным слоем MgO. Были проведены исследования поляризационных характеристик. На рисунке 8 представлены зависимости степени циркулярной поляризации электролюминесценции, от магнитного поля для ССИД с инжекторами (In,Fe)Sb и GaAs:Fe, измеренные в диапазоне температур от 10 до 300К.

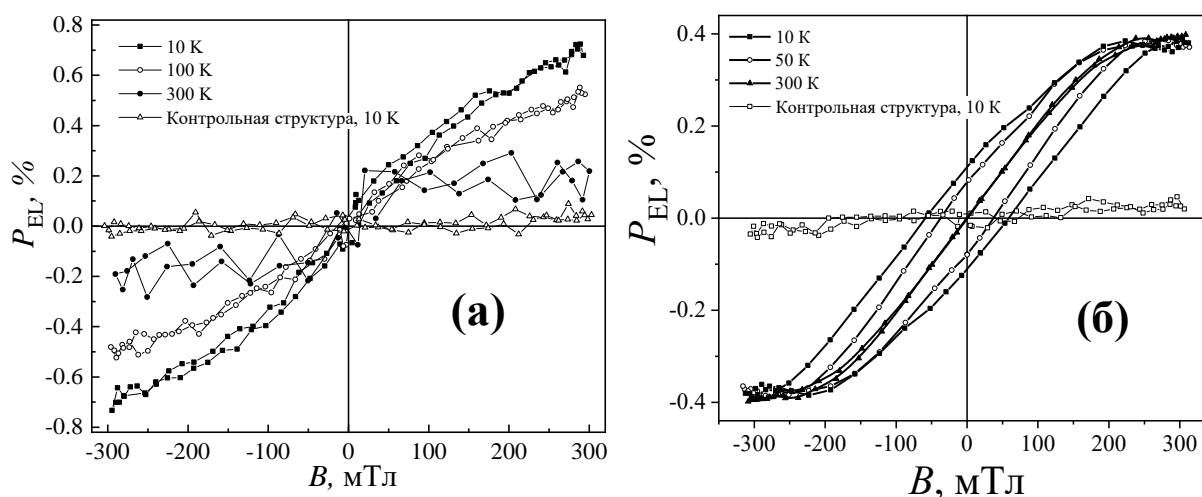


Рисунок 8. Магнитополевые зависимости P_{EL} спиновых светодиодов при различных температурах с инжекторами (а) (In,Fe)Sb и (б) GaAs:Fe. Также представлены $P_{EL}(B)$ для контрольных структур (без инжектора $A^3B^5:Fe$) при температуре 10 К.

Было показано наличие циркулярно-поляризованной электролюминесценции при прямом электрическом смещении спиновых светоизлучающих диодов, которое регистрируется вплоть до температуры 300 К. Сопоставление магнитолевых зависимостей P_{EL} исследованных и контрольных структур показало, что в структурах с контактами на основе разбавленного магнитного полупроводника реализуется инжекция спин-поляризованных электронов из слоя РМП $A^3B^5:Fe$, а именно $(In,Fe)Sb$ и $GaAs:Fe$, в полупроводниковую структуру на основе $GaAs$ в режиме прямого электрического смещения. Спин-поляризованные электроны переносятся в активную область полупроводникового светоизлучающего диода с дальнейшей рекомбинацией и испусканием электролюминесцентного излучения. Максимальное значение P_{EL} было получено для спинового светодиода с инжектором $(In,Fe)Sb$ при температуре 10К и составило 0,7%.

В заключении сформированы основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. Применение импульсного лазерного отжига позволяет повысить рабочую температуру спиновых светоизлучающих диодов, в которых источником спин-поляризованных носителей является слой $(Ga,Mn)As$. Проведённые гальваномагнитные измерения и измерения циркулярно-поляризованной электролюминесценции изготовленных спиновых светодиодов показали, что повышение рабочей температуры спинового светодиода происходит вследствие увеличения температуры Кюри слоя $(Ga,Mn)As$ до ~ 120 К под воздействием лазерного отжига, в то время как эта величина для спиновых светодиодов с неотожжённым $(Ga,Mn)As$ инжектором составляет 30 К.
2. Формирование спиновых светоизлучающих диодов с инжектором в виде разбавленного магнитного полупроводника $(Ga,Mn)As$ комбинированным

методом МОС-гидридной эпитаксии и импульсного лазерного осаждения с последующим импульсным лазерным отжигом позволяет достигать рабочих температур, которые соответствуют аналогичным показателям для структур, сформированных методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

3. Показано, что слои разбавленных магнитных полупроводников $A^3B^5:Fe$, в частности $(In,Fe)Sb$ и $GaAs:Fe$, могут быть использованы в качестве функциональных контактных слоёв в приборах спинтроники, а именно в спиновых светоизлучающих диодах при нанесении на $GaAs$ структуры n- и p-типа проводимости.

4. Механизмы протекания тока в гетероструктурах $(In,Fe)Sb/n-GaAs$ и $(In,Fe)Sb/p-GaAs$ близки к механизмам протекания тока в диодах с барьером Шоттки. В случае гетероструктуры $GaAs:Fe/p-GaAs$ формируется структура аналогичная диоду с p-n переходом, в которой слой $GaAs:Fe$ является материалом n-типа проводимости.

5. Нанесение слоя $A^3B^5:Fe$ методом импульсного лазерного осаждения на спейсерный слой $GaAs$ не оказывает влияния на квантовую яму, расположенную на минимальном удалении (30 нм) от поверхности, но влияет на свойства гетерограницы $A^3B^5:Fe/GaAs$. Осаждение защитного слоя MgO между $GaAs$ и $A^3B^5:Fe$ позволяет минимизировать это влияние.

6. В спиновых светоизлучающих диодах с инжекторами $A^3B^5:Fe$, а именно с $(In,Fe)Sb$ и $GaAs:Fe$, при внесении во внешнее магнитное поле, реализуется инжекция спин-поляризованных носителей из разбавленного магнитного полупроводника в полупроводниковую гетероструктуру на основе $GaAs$ в режиме прямого электрического смещения, вследствие чего генерируется циркулярно-поляризованная электролюминесценция.

7. Рабочая температура спиновых светоизлучающих диодов с инжекторами $(In,Fe)Sb$ и $GaAs:Fe$ достигает 300 К.

Список цитированной литературы

1. Spintronics: Fundamentals and applications / I. Zutic, J. Fabian, S. Das Sarma // *Rev. Mod. Phys.* - 2004. - V.76. - P.323-410.
2. Concepts in spin electronics / Ed. by S. Maekawa. - New York: Oxford University Press. - 2006. - 398 P.
3. New moves of the spintronics tango / J. Sinova, I. Zutic // *Nature Materials.* - 2012. - V.11, n.5. - P.368-371.
4. 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).
5. Antiferromagnetic spintronics / T. Jungwirth, X. Marti, P. Wadley and J. Wunderlich // *Nature Nanotechnology.* - 2016.- V.11.- P. 231–241.
6. Low-temperature magnetotransport behaviors of heavily Mn-doped (Ga,Mn)As films with high ferromagnetic transition temperature / L. Chen, S. Yan, P. F. Xu, J. Lu, W. Z. Wang, J. J. Deng, X. Qian, Y. Ji, and J. H. Zhao // *Appl.Phys.Lett.* - 2009. - V.95. - P.182505.
7. High-temperature ferromagnetism in heavily Fe-doped ferromagnetic semiconductor (Ga,Fe)Sb / N. T. Tu, P. N. Hai, L. D. Anh, and M. Tanaka // *Appl. Phys. Lett.* - 2016.- V.108.- P. 192401.
8. High-temperature intrinsic ferromagnetism in the (In,Fe)Sb semiconductor / A. Kudrin, Yu. Danilov, V. Lesnikov, M. Dorokhin, O. Vikhrova, D. Pavlov, Yu. Usov, I. Antonov, R. Kriukov, A. Alaferdov, and N. Sobolev // *J. Appl. Phys.* – 2017.- V. 122.- P. 183901.
9. High-temperature intrinsic ferromagnetism in heavily Fe-doped GaAs layers / A.V. Kudrin, V.P. Lesnikov, Yu.A. Danilov, M.V. Dorokhin, O.V. Vikhrova, P.B. Demina, D.A. Pavlov, Yu.V. Usov, V. E. Milin, Yu.M. Kuznetsov, R.N. Kriukov, A.A. Konakov, N. Yu. Tabachkova // *Semicond. Sci. Technol.* - 2020. - V.35, P.125032.
10. Circularly polarized electroluminescence of light-emitting InGaAs/GaAs (III, Mn)V diodes on the basis of structures with a tunneling barrier / E. Malysheva, M. Dorokhin, M. Ved', A. Kudrin and A. Zdoroveishchev // *Semicond.* - 2015.- V.49. P. 1448-1452.
11. Holub, M. Spin-polarized light-emitting diodes and lasers / M. Holub, P. Bhattacharya // *J. Phys. D: Appl. Phys.* - 2007. - V.40. - P.R179–R203.
12. Modification of the properties of ferromagnetic layers based on A3B5 compounds by pulsed laser annealing / O. V. Vikhrova, Yu. A. Danilov, B. Zvonkov, A. Zdoroveishchev, A. Kudrin, V. Lesnikov, A. Nezhdanov, S. Pavlov, A. Paraffin, I. Pashenkin, and S. Plankina // *Phys. Solid State.* - 2017.- V.59.- P.2150.
13. Epitaxial Fe/MgO heterostructures on GaAs(001) / C. Martínez Boubeta, E. Navarro, A. Cebollada, F. Briones, F. Peiró, A. Cornet // *Journal of Crystal Growth.* - 2001. - V. 226. - P. 223.

Список основных опубликованных работ автора по теме диссертации

- A1. Circularly polarized electroluminescence of light-emitting InGaAs/GaAs (III, Mn)V diodes on the basis of structures with a tunneling barrier / E. I. Malysheva, M. V. Dorokhin, M. V. Ved', A. V. Kudrin, A. V. Zdoroveishchev // *Semicond.*- 2015.- V. 49.- P. 1448–1452.
- A2. Tunneling and Injection in Ferromagnetic Structures InGaAs/GaAs/(Ga,Mn)As and InGaAs/n+-GaAs/(Ga,Mn)As / E. I. Malysheva, M. V. Dorokhin, A.V.Zdoroveishchev, M. V. Ved // *Phys. Solid State.*- 2016.- V. 58.- P. 2271–2276.
- A3. Raising the Operating Temperature of (Ga,Mn)As/GaAs Spin Light Emitting Diodes by Applying Post-Growth Treatment / E. I. Malysheva, M. V. Dorokhin, Yu. A. Danilov, A. E. Parafin, M. V. Ved', A. V. Kudrin, A. V. Zdoroveyshchev // *Phys. Solid State.*- 2018.- V. 60.- P. 2182–2187.
- A4. On the mechanism of spin-polarized injection in (Ga,Mn)As/n+GaAs/InGaAs Zener tunnel diode / M. Ved, M. Dorokhin, E. Malysheva, A. Zdoroveyshchev, Yu. Danilov, A. Parafin and Yu. Kuznetsov // *J. Phys.: Conf. Ser.*- 2018.- V. 1124.- P. 061005
- A5. Diode Structures Based on (In,Fe)Sb/GaAs Magnetic Heterojunctions / M. V. Ved', M. V. Dorokhin, V. P. Lesnikov, D. A. Pavlov, Yu. V. Usov, A. V. Kudrin, P. B. Demina, A. V. Zdoroveishchev, Yu. A. Danilov // *Tech. Phys. Lett.*- 2019.- V. 45.- P. 668-671.
- A6. Fabrication and luminescent properties of (In,Fe)Sb/GaAs/InGaAs diodes / M. V. Ved, M. V. Dorokhin, V. P. Lesnikov, A. V. Zdoroveyshchev, Yu. A. Danilov, P. B. Demina and A. V. Kudrin // *J. Phys.: Conf. Ser.*- 2019.- V. 1410.- P. 012053.
- A7. Circularly Polarized Electroluminescence of Spin LEDs with a Ferromagnetic (In,Fe)Sb Injector / M. V. Ved, M. V. Dorokhin, V. P. Lesnikov, A. V. Kudrin, P. B. Demina, A. V. Zdoroveishchev, D. A. Pavlov, Yu. V. Usov, V. E. Milin & Yu. A. Danilov // *Tech. Phys. Lett.* - 2020. - V.46. - P. 691-694.
- A8. Циркулярно-поляризованная электролюминесценция при комнатной температуре в гетероструктурах на основе разбавленного магнитного полупроводника GaAs:Fe / Ведь М.В., Дорохин М.В., Лесников В.П., Кудрин А.В., Дёмина П.Б., Здоровейщев А.В., Данилов Ю.А. // *ПЖТФ.* - 2021. - Т. 47, вып. 20. - С. 38-41.