

На правах рукописи



Крюков Руслан Николаевич

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РАЗБАВЛЕННОГО
МАГНИТНОГО ПОЛУПРОВОДНИКА GaMnAs**

Специальность 01.04.10 – Физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2019 г.

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

Научный руководитель:

Николичев Дмитрий Евгеньевич,
кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры физики полупроводников,
электроники и наноэлектроники физического
факультета Нижегородского государственного
университета им. Н.И. Лобачевского

Официальные оппоненты:

Козаков Алексей Титович,
доктор физико-математических наук, профессор
главный научный сотрудник лаборатории физики
поверхности и гетероструктур отдела
рентгеновской и электронной спектроскопии НИИ
физики Южного федерального университета

Федотова Юлия Александровна,
доктор физико-математических наук,
заведующая лабораторией физики перспективных
материалов Научно-исследовательского
учреждения «Институт ядерных проблем»
Белорусского государственного университета

Ведущая организация:

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Воронежский государственный
университет»**

Защита состоится «11» декабря 2019 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д212.166.01 в Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603950, 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 (<http://diss.unn.ru/964>).

Автореферат разослан « » октября 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.166.01,
кандидат физико-математических наук

 **Марычев Михаил Олегович**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Поиск путей увеличения скорости обработки информации привел к возникновению спроса на материалы, которые бы обладали ранее не совместимыми свойствами. Примером таких систем являются разбавленные магнитные полупроводники (РМП), совмещающие в себе полупроводниковые и ферромагнитные свойства. Применение РМП ограничено по причине неудовлетворительных эксплуатационных характеристик и чувствительности к изменению технологических параметров их создания. Например, разбавленный магнитный полупроводник GaMnAs, используемый для разработки прототипов приборов *спинтроники*, имеет температуру фазового перехода ферромагнетик/парамагнетик значительно ниже комнатной. Это, в свою очередь, не позволяет развивать спинтронику как полноценную альтернативу современной электроники.

На данный момент существует проблема создания комплексной картины поведения разбавленных магнитных полупроводников, в общем, и GaMnAs в частности. Существующие модели эволюции электрических и магнитных свойств этих материалов позволяют объяснить лишь частные случаи и не дают полного представления о процессах, протекающих в этих системах при воздействии внешних факторов. Остается неизученным изменение характеристик РМП при различных толщинах слоев. Отсутствует понимание взаимосвязи свойств РМП с параметрами их получения различными методами: низкотемпературной молекулярно-лучевой эпитаксией (НТ-МЛЭ), ионным легированием полупроводниковых подложек ионами металлов группы железа, импульсным лазерным осаждением (ИЛО).

Очевидным является необходимость всестороннего изучения химических процессов, протекающих в РМП, так как именно изменение соотношения концентраций магнитных соединений в слоях является первопричиной вариации свойств систем. При этом в работе термин «соединение» включает в

себя стехиометрические химические соединения MnAs , GaAs , InAs , MnO , Mn_2O_3 и т.д., а также обособленные состояния атомов: Mn_{Ga} , As_{Ga} , проявляющие специфические физико-химические свойства. Сложность обобщения данных о физико-химических процессах в РМП на данный момент связана с ограниченностью методов диагностики химических соединений.

Работа содержит результаты исследований характеристик отдельных слоев GaMnAs , созданных методом импульсного лазерного осаждения и прототипов приборов спинтроники – спинового светоизлучающего диода (ССИД) со слоями РМП, полученных комбинированным методом газовой эпитаксии из металлоорганических соединений (МОС ГФЭ). Помимо химического анализа РМП, были изучены их магнитооптические свойства. Проанализировано влияние низкотемпературного отжига на физико-химические свойства разбавленных магнитных полупроводников. Были исследованы альтернативные пути решения задачи реализации РМП с оптимальными характеристиками: иная матрица полупроводника (InAs), другая магнитная примесь (Fe) и другой метод создания – ионное легирование.

Цели и задачи работы

Основной целью работы являлось определение химического и фазового состава слоев разбавленных магнитных полупроводников, выращенных методом импульсного лазерного осаждения, определение закономерностей в эволюции физико-химических свойств РМП GaMnAs в зависимости от параметров ростового процесса и постростовой обработки структур.

В ходе работы был решен ряд задач:

1. построение в рамках метода рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии методики диагностики разбавленных магнитных полупроводников для нахождения и разделения всех химических соединений на примере GaMnAs ;
2. рассмотрение влияния технологических параметров импульсного лазерного осаждения на физико-химические свойства слоев GaMnAs ;

3. сопоставление свойств слоев GaMnAs, полученных методами импульсного лазерного осаждения и ионного легирования GaAs;
4. выявление закономерностей распределения химических соединений в системе GaMnAs и механизмов, приводящих к их эволюции;
5. определение связи состава и структуры GaMnAs с магнитными и оптическими свойствами;
6. изучение влияния физико-химических процессов при проведении низкотемпературного отжига системы GaMnAs на изменение ее магнитооптических свойств;
7. распространение разработанной методики химического анализа на другие системы разбавленных магнитных полупроводников на основе A^3B^5 , легированных атомами переходных металлов, с подтверждением точности анализа.

Научная новизна работы

Новизна работы обусловлена следующими результатами: создана и апробирована методика определения концентрации марганца, выступающего как примесь замещения в полупроводнике GaAs; определена возможность распространения такого подхода на другие системы разбавленных магнитных полупроводников; впервые получены профили распределения по глубине химических соединений в слоях разбавленных магнитных полупроводников: GaMnAs, InMnAs и GaFeSbAs. Отмечено низкое влияние ионного травления (Ar^+ с энергией 1 кэВ и углом наклона оси ионного источника относительно нормали поверхности образца 45°) на профили распределения по глубине Mn. Выявлена зависимость присутствия галлидов марганца в слоях GaMnAs от количества арсина в реакторе в процессе импульсного лазерного осаждения. Определено присутствие диффузионного механизма проникновения кислорода в слои низкотемпературных GaMnAs и GaAs.

В ходе оригинальных экспериментов, заключавшихся в низкотемпературном отжиге слоев GaMnAs в условиях сверхвысокого вакуума

(3×10^{-9} Торр), определено, что низкотемпературный отжиг слоев GaMnAs в диапазоне 190–380°C в течение 5 часов приводит к агрегации атомов марганца, расположенных в узлах галлия, что влечет увеличение концентрации MnAs. В случае расположения GaMnAs на поверхности структур регистрируется сегрегация Mn на поверхности. Установлено, что избыточность мышьяка в покровных слоях низкотемпературного GaAs ограничивает процесс диффузии кислорода вглубь структур. Зарегистрировано влияние охлаждения подложки GaAs в процессе ионного легирования на профили распределения химических элементов и соединений по глубине. Определена возможность создания РМП на основе четверного раствора GaFeAsSb с низкой концентрацией элементного Fe.

Результаты диссертации позволили обновить курс лекций «Методы диагностики и анализа микро- и наносистем», читаемый на физическом факультете ННГУ. Для этого курса разработано и издано в электронном виде учебное пособие для магистрантов («Химический анализ твердотельных гетеронаносистем методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии» <http://www.unn.ru/books/resources.html>, регистрационный номер 665.14.05).

Методология, теоретическая и практическая значимость работы

Модернизация аттестованной методики исследования состава материалов, проявляющих ферромагнетизм, позволила снизить относительную погрешность определения концентрации химических элементов до 5 % и менее. При ее совершенствовании удалось добиться относительной погрешности измерения количества марганецсодержащих соединений, не превышающей 10 – 20 %. В рамках методики разработан математический подход определения концентрации атомов марганца, расположенных в узлах полупроводника GaAs. Установлено, что методика полностью применима для исследований других разбавленных магнитных полупроводников на основе A^3B^5 .

В работе определено влияние условий технологического процесса импульсного лазерного осаждения на химический состав и структуру слоев

$(A^3, Mn)B^5$. Выявлена качественная связь между магнитными свойствами РМП GaMnAs и кластерной композицией этой системы. Определено изменение химического состава слоев GaMnAs при проведении низкотемпературного отжига. Рассмотрено поведение оксидных соединений галлия и мышьяка на поверхности слоев GaMnAs при хранении структур в нормальных условиях.

Сравнение результатов, полученных для слоев GaMnAs, выращенных методом импульсного лазерного осаждения, со свойствами слоев, созданных методом низкотемпературной эпитаксии, позволяет сделать вывод об их схожих химических и структурных характеристиках. Это, в свою очередь, говорит о единообразии физико-химических процессов, проходящих в таких системах.

Продемонстрирована возможность получения разбавленного магнитного полупроводника на основе раствора GaFeAsSb с концентрацией элементного Fe менее 0,2 ат. %.

Положения, выносимые на защиту

1. Количество арсина в реакторе при проведении импульсного лазерного осаждения при температуре подложки 250 – 350°C регулирует концентрацию химических соединений в слоях GaMnAs: при превышении суммарной концентрации Ga и Mn над содержанием As в слое формируются включения MnAs и $MnGa_y$; при обратном неравенстве в слоях формируется преимущественно MnAs.
2. Для тонких слоев GaMnAs, созданных методом импульсного лазерного осаждения и покрытых $Ga_{0,4}As_{0,6}$, отжиг в сверхвысоком вакууме при температурах до 380°C в течение 5 часов приводит к увеличению концентрации соединения MnAs за счет агрегации атомов Mn, расположенных в узлах решетки GaAs. Увеличение температуры отжига ускоряет процесс агрегации. Концентрация элементного марганца при этом не изменяется.
3. Концентрация замещающего Mn в слоях GaMnAs, выращенных методом импульсного лазерного осаждения с температурой подложки 250 – 350°C,

достигает максимальной концентрации при общей концентрации неоксидированного Mn 7 ± 1 ат. %.

4. В слоях GaFeAsSb, выращенных методом импульсного лазерного осаждения, возможно создание слоев разбавленного магнитного полупроводника с концентрацией элементного Fe менее 0,2 ат. %, в отличие от систем GaMnAs и InMnAs, где содержание элементного Mn составляет более 0,5 ат. %.

Достоверность результатов

Применение в ходе выполнения работы аттестованной методики измерений, усовершенствованной и дополненной в ходе исследований, позволило обеспечить достоверность результатов, описанных в экспериментальной части работы. Комплексный подход к изучению систем РМП с использованием высокоразрешающей просвечивающей микроскопии, магнитных и магнитооптических измерений обеспечивает надежность проведенных исследований.

Апробация работы

Результаты работы докладывались на 15-й всероссийской молодежной конференции «Физика полупроводников и наноструктур, полупроводниковая опто- и наноэлектроника» (25-29 ноября 2013 г. Россия, Санкт-Петербург), 3-й школе молодых ученых по физике наноструктурированных и кристаллических материалов (15-17 мая 2014 г. Россия, Нижний Новгород), XXV Российской конференции по электронной микроскопии «РКЭМ-2014» (2-7 июня 2014 г. Россия, Черноголовка), IV International Scientific Conference STRANN 2014 (22-24 апреля 2014 г. Россия, Санкт-Петербург), XIX Международном Симпозиуме «Нанопфизика и наноэлектроника» (10-14 марта 2015 г. Россия, Нижний Новгород), XV конференции и VIII школе молодых ученых «Высококачественные вещества и материалы: получение, анализ, применение» (26-29 мая 2015 г. Россия, Нижний Новгород), XXI Международном симпозиуме «Нанопфизика и наноэлектроника» (13-16 марта 2017 г. Россия, Нижний Новгород), NaNaX 8 -

nanoscience with Nanocrystals (3-7 июля 2017 г. Португалия, Брага), Moscow International Symposium on Magnetism (1-5 июля 2017 г. Россия, Москва), III International Conference on Modern Problems in Physics of Surfaces and Nanostructures (9-11 октября 2017 г., Россия, Ярославль), XXII научном симпозиуме «Нанопизика и нанопэлектроника» (12-15 марта 2018 г., Россия, Нижний Новгород), XXVII Российской конференции по электроннй микроскопии (28-30 августа 2018 г., Россия, Черноголовка), X Всероссийской школе-семинаре студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Диагностика наноматериалов и наноструктур» (1-6 октября 2018 г., Россия, Рязань), 20 Всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и нанопэлектронике (26-30 ноября 2018 г., Россия, Санкт-Петербург).

Публикации

Всего по теме диссертационной работы опубликовано 26 научных и учебно-методических работ, в том числе: 1 учебно-методическое пособие 5 статей в ведущих научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и 20 публикаций в сборниках трудов и тезисах докладов российских и международных научных конференций.

Личный вклад автора

Результаты экспериментов, выполненных методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, их обобщение и интерпретация данных была проведена лично автором диссертации. Автор принимал непосредственное участие в разработке уникальной методики получения информации о химическом составе наносистем из данных рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Им лично была проведена адаптация этого подхода для систем разбавленных магнитных полупроводников. Автор самостоятельно провел анализ информации о структурных, магнитных и электрических свойствах разбавленных магнитных полупроводников.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 5-ти глав и заключения. Общий объем диссертации составляет 172 страниц, включая 83 рисунка. Список цитируемой литературы включает 191 наименование.

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 разбавленных магнитных полупроводниках, являющихся предметом исследований. Содержится описание приборов спинтроники: спинового клапана, спинового полевого транзистора, спинового светоизлучающего диода (ССИД). В главе содержатся актуальные сведения о свойствах GaMnAs, от которых зависит приборное применение материала: параметрах решетки, температуре Кюри и влиянии концентрации носителей заряда на характеристики устройств. Представлены сравнительные характеристики различных ферромагнитных материалов, применяемых при проектировании приборов спинтроники. Рассматриваются структурные, электрические свойства, модели возникновения ферромагнетизма. Обоснована необходимость создания слоя GaMnAs с максимально возможной концентрацией атомов Mn, расположенных в узлах Ga (Mn_{Ga}), без формирования включений MnAs и MnGa_3 . Представлена информация о методах получения РМП: низкотемпературной молекулярно-лучевой эпитаксии, ионном легировании, импульсном лазерном осаждении. Описаны способы постростовой обработки материала для оптимизации свойств РМП: низкотемпературный и импульсный лазерный отжиги. Обобщено и показано, что при применении НТО наилучшие характеристики GaMnAs

проявляются при отжиге с температурой 250°C в течение 5 часов. В главе также представлена информация о фазовом и химическом составе слоев GaMnAs, формируемых методами ионного легирования и низкотемпературной эпитаксии. Отмечены различия фазового состава структур, получаемых при различных технологических параметрах.

Во **второй главе** представлено описание методики создания структур, изучаемых в ходе работы. На подложке *n*-GaAs (001), после высокотемпературного отжига в условиях вакуума, методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений при температуре 550 – 600°C выращивались буферный слой GaAs буферный слой GaAs толщиной ~ 1 мкм, квантовая яма $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x \sim 0,13$) толщиной ~ 10 нм и слой GaAs толщиной 5 – 140 нм. После понижения температуры до 250 – 350°C методом ИЛО создавался слой GaMnAs или $\delta\text{-Mn}$. В ряде структур выращивался слой GaAs. Несколько проанализированных образцов представляли собой слой РМП, выращенных методом ИЛО при температуре подложки 250 – 350°C. Толщина варьировалась в диапазоне 40 – 100 нм. Подробно методика описана в [1].

В главе приведено описание методов, применявшихся в работе: высокоразрешающая просвечивающая электронная микроскопия (ВР ПЭМ), атомно-силовая микроскопия, растровая электронная микроскопия с энергодисперсионной спектроскопией, уникальные методики диагностирования магнитных и магнито-оптических характеристик.

Раздел содержит подробное описание метода рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, поскольку он позиционируется в работе как основной способ диагностики. При анализе фотоэлектронного (ФЭ) спектра получена информация об элементном и химическом составе структур [2]. Идентификация химических элементов осуществляется с использованием атласов [3] по положению ФЭ-линий, а концентрация по их интенсивности с использованием экспресс-методик: метода факторов относительной чувствительности (ФОЧ) и метода внешних эталонов. С использованием

«химического сдвига» производится определение химических соединений и расчет их концентрация. Метод РФЭС аппаратно реализован на базе сверхвысоковакуумного (СВВ) комплекса Omicron Multiprobe RM.

В третьей главе рассмотрена методика диагностики образцов в рамках РФЭС. Описан графическо-математический подход к анализу ФЭ-линий Ga 3*d*, As 3*d* и Mn 2*p*_{3/2}, регистрируемых при диагностике GaMnAs.

Графическая часть методики основана на сопоставлении формы ФЭ-линий, полученных при диагностике различных соединений. При этом производится их спектральное разложение на отдельные составляющие, каждая из которых отвечает определенному химическому соединению. Для РМП GaMnAs аппроксимация ФЭ-линий суперпозицией функций Гаусса и Лоренца представлена на рис. 1.

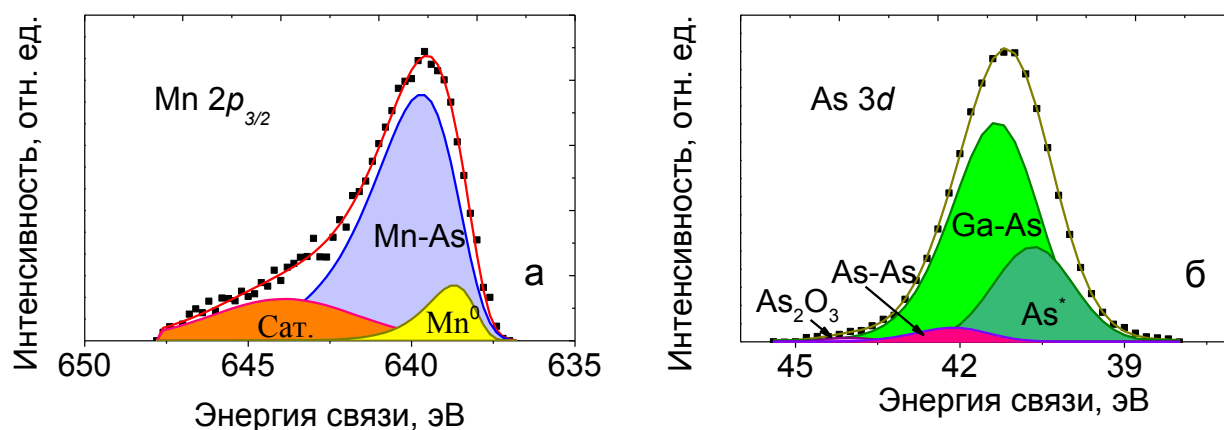


Рис. 1. Спектральное разложение ФЭ-линий а) Mn 2*p*_{3/2}, б) As 3*d*.

Математическая составляющая оперирует наличием связи интенсивностей спектральных компонент, относящихся к одному химическому соединению, через его стехиометрию. Эта связь определяет существование систем уравнений (1). Например, на один атом Ga в соединении GaAs должен приходиться один атом As, в соединении Mn₂O₃ на 3 атома кислорода 2 атома Mn и т.д.

Полученные из графического этапа результаты разложения ФЭ-линий проходят несколько итераций уточнения. Это позволяет доопределить

химические состояния и их концентрацию. Если системы уравнений не сходятся, то модель спектрального разложения подвергается модификации путем добавления или удаления спектральных компонент. Таким образом, например, было выявлено присутствие в ряде образцов GaMnAs галлидов.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{I_{As_2O_3}^{As} + I_{As_2O_5}^{As} + I_{As^0}^{As} + I_{MnAs}^{As} + I_{GaAs}^{As} + I_{Asdef}^{As}}{I^{As}} = 1 \\ \frac{I_{GaAs}^{Ga} + I_{Ga_2O_3}^{Ga} + I_{Ga_2O}^{O}}{I^{Ga}} = 1 \\ \frac{I_{Mn^0}^{Mn} + I_{MnAs}^{Mn} + (I_{MnO}^{Mn} + 0.12 I_{Sat}^{Mn}) + I_{Mn_2O_3}^{Mn} + I_{MnO_2}^{Mn} + I_{GaMnAs}^{Mn}}{I^{Mn}} = 1 \\ \frac{I_{As_2O_3}^{O} + I_{As_2O_5}^{O} + I_{Ga_2O_3}^{O} + I_{Ga_2O}^{O} + I_{MnO}^{O} + I_{Mn_2O_3}^{O} + I_{MnO_2}^{O}}{I^{O}} = 1 \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{3/2 \cdot I_{As_2O_3}^{As} + 5/2 \cdot I_{As_2O_5}^{As}}{S_{As}} + \frac{3/2 \cdot I_{Ga_2O_3}^{Ga} + 1/2 \cdot I_{Ga_2O}^{Ga}}{S_{Ga}} + \\ + \frac{(I_{MnO}^{Mn} + 0.1 \cdot I_{Sat}^{Mn}) + 3/2 \cdot I_{Mn_2O_3}^{Mn} + 2 \cdot I_{MnO_2}^{Mn}}{S_{Mn}} + \frac{I_{C-O}^C}{S_C} = \frac{I_{Oxides}^O}{S_O} \\ \frac{I_{GaAs+InAs}^{As}}{S_{As}} = \frac{I_{GaAs}^{Ga}}{S_{Ga}} + \frac{I_{InAs}^{In}}{S_{In}} \\ 2 \cdot (I_{Sat}^{Mn} - 0.1 \cdot I_{MnO}^{Mn}) = I_{GaMnAs}^{Mn} \\ I_{Mn-As}^{Mn} - I_{GaMnAs}^{Mn} = I_{MnAs}^{Mn} \\ \frac{I_{MnAs+GaMnAs+Asdef}^{As}}{S_{As}} = \frac{I_{MnAs}^{Mn}}{S_{Mn}} + \frac{I_{GaMnAs}^{Mn}}{S_{Mn}} + \frac{I_{Asdef}^{As}}{S_{As}} \end{array} \right. \quad (1)$$

где I_j^i – интенсивность спектральной компоненты i -элемента, соответствующего j -соединению; S_i – ФОЧ i -элемента.

Комбинация этих подходов позволяет уменьшить относительную погрешность элементного анализа до 4 – 6 %, а химического - до уровня 10 – 20 %. С использованием такой методики было проанализировано два типа приборных структур ССИД, отличающихся технологическими параметрами. Основным химическим соединением является материал полупроводника. Выдерживание структур в условиях атмосферы приводит к появлению на поверхности оксидов Ga и As. Было определено, что критичным для слоев GaMnAs является соотношение концентраций As и Ga (рис. 2). Практически на всей глубине слоя РМП детектируется кислород, что свойственно для GaAs,

выращенного при низких температурах [4] (рис. 2, а,б).

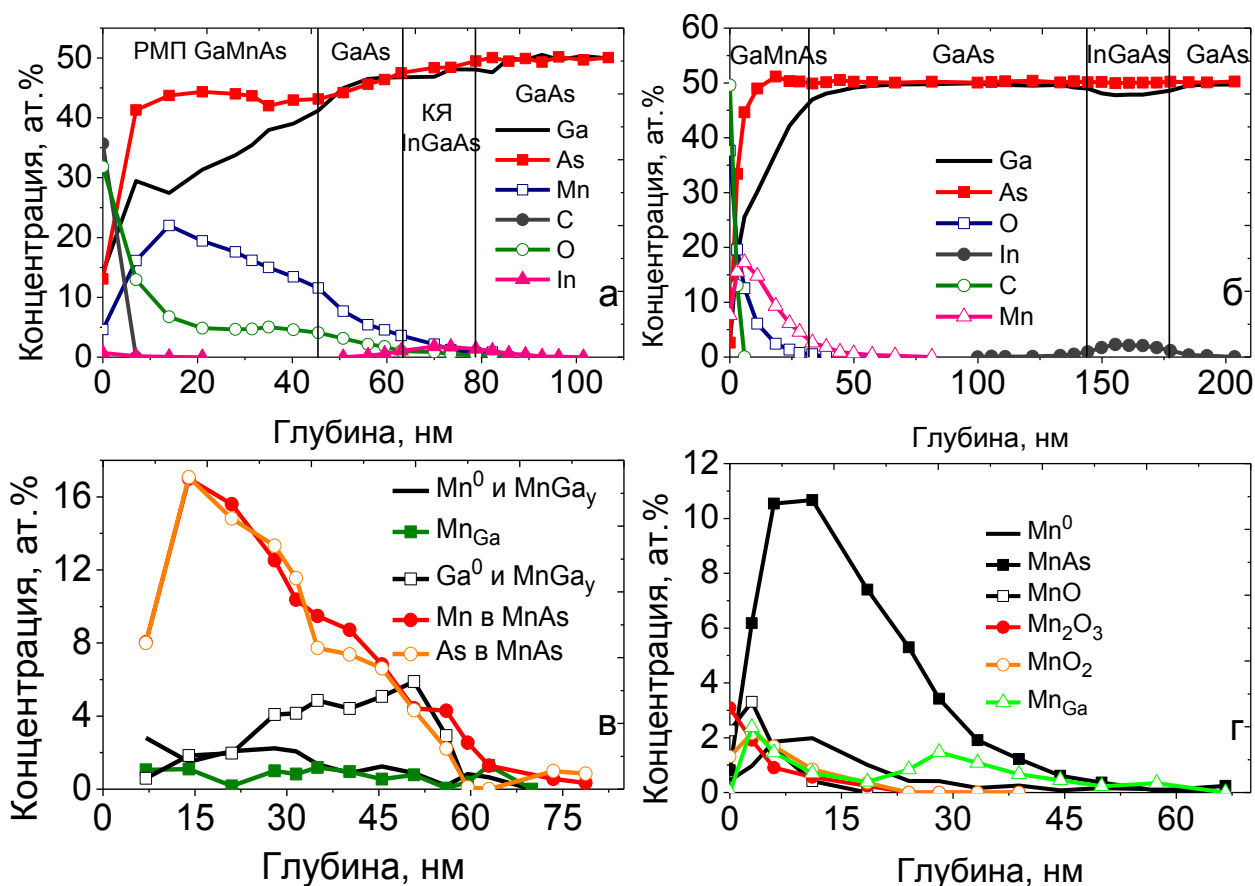


Рис. 2. Профили распределения химических элементов по глубине в ССИД с GaMnAs, где концентрация Ga и Mn а) больше As и б) меньше As. Профили распределения химических соединений Mn в ССИД с GaMnAs, где концентрация Ga и Mn в) больше As и г) меньше As.

Глубже присутствует значительное количество оксидов Mn. Основным марганецсодержащим соединением является MnAs, который составляет более 60 % от общей концентрации химических соединений марганца при любых изменениях содержания Ga и As. Основным отличием образцов с примерно равной концентрацией Ga и As является присутствие в них MnGa_y или элементного Ga и Mn на уровне, достаточном для регистрации методом РФЭС. Стоит заметить, что в случае MnGa_y имеется вариация y по глубине. Концентрация замещающего Mn_{Ga} в таком случае не превышает 1,5 ат. % (рис. 2, в). Если в системе преимущественно содержится As, то отсутствуют MnGa_y, Ga⁰, и имеется значительное количество дефектного As

(антиструктурные дефекты, димеры). Концентрация Mn_{Ga} при этом уже достигает 2 ат.%. (рис. 2, г). Аналогичное поведение характерно для δ -<Mn> с концентрацией Mn в максимуме распределения на уровне 5 ат.%.

Поведение системы в этом случае соответствует комбинации модельных представлений о РМП (рис. 3) [5, 6]. Из рис. 3 следует, что содержание Mn в слое является критичным, и максимальная концентрация Mn_{Ga} достигается при суммарном количестве неоксидированного Mn на уровне 7 ат.%. Наблюдается взаимосвязь между кривыми содержания Mn_{Ga} и MnAs, что обусловлено механизмом их формирования, т.е. появлением Mn_{Ga} в соседних узлах вместо Ga приводит к образованию MnAs.

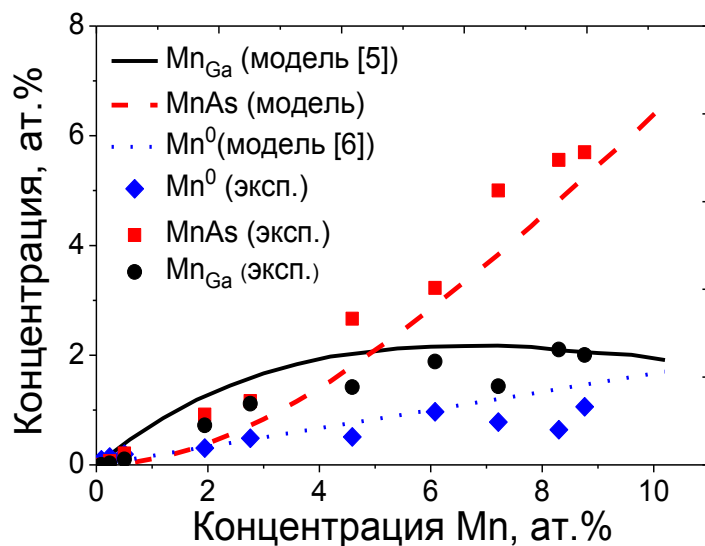


Рис. 3. Сопоставление экспериментально полученных данных из рис. 2, г и модельных представлений о РМП.

Многофазность слоев GaMnAs была подтверждена при исследовании структуры ССИД методом ВР ПЭМ. Было выявлено присутствие включений гексагонального MnAs и областей, соответствующих MnAs с кубической решеткой (рис. 4). Метод ВР ПЭМ позволил определить, что размытие профиля распределения Mn, получаемого комплексным методом РФЭС и ионного травления, обусловлено диффузионной активностью этого элемента.

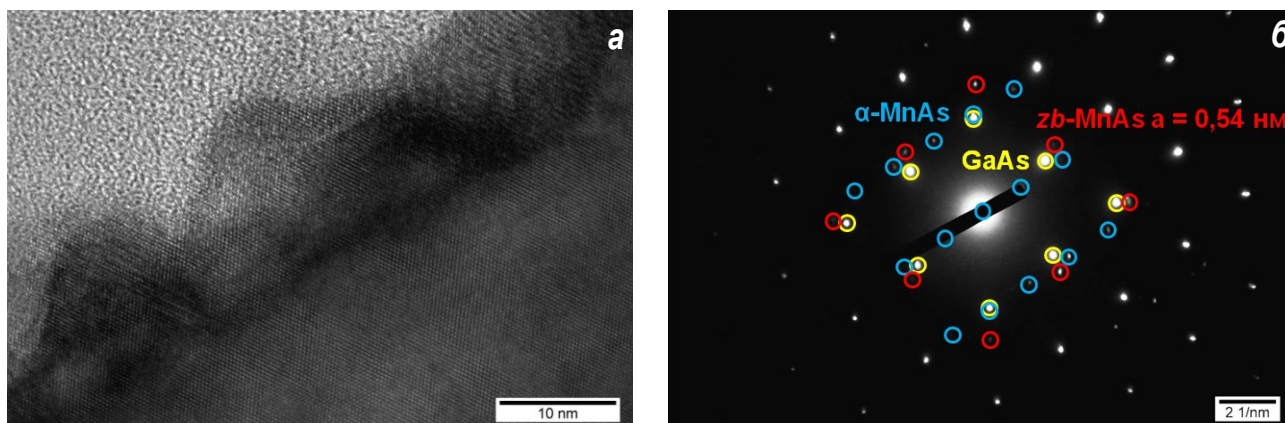


Рис. 4. а) ПЭМ-изображение поперечного среза структуры ССИД; б) электронограмма области, отображенной на ПЭМ-снимке.

Диагностика магнитных и магнито-оптических свойств позволила определить, что зависимость концентрации Mn_{Ga} от общего содержания неоксидированного Mn определяет изменение температуры Кюри и концентрации носителей заряда для слоев $GaMnAs$. Это выражается в существовании локального максимума этих параметров при концентрации Mn , равной 7 ат. % (рис. 5).

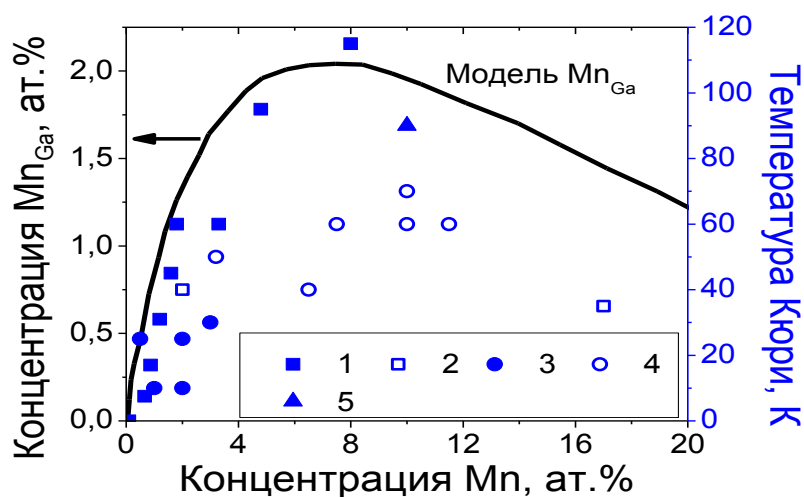


Рис. 5. Модельная зависимость концентрации Mn_{Ga} и зависимость критической температуры от общего содержания неоксидированного марганца ((1) – данные $M(T)$ из [7, 8]; (2) – данные о намагниченности, полученные при исследовании слоев $GaMnAs$, выращенных ИЛО; данные о поляризации излучения для (3) δ - $\langle Mn \rangle$ и (4) $GaMnAs$ (температуры при которых $P_{эл}(B) \approx 0$); (5) – данные из [9].

Анализ поверхности слоев GaMnAs позволил определить, что кислород, детектируемый в слоях GaMnAs, является следствием диффузии кислорода в слое низкотемпературного GaAs. Так, на рис. 6, а зависимость толщины слоя оксидов от времени можно объяснить различными процессами, протекающими в пленке. В первые сутки на поверхности НТ-GaAs происходит рост неустойчивого оксидного слоя, являющегося продолжением кристаллической решетки GaAs. После достижения критической толщины в 0,8 нм происходит преобразование кристаллического порядка в кубическую решетку оксидов Ga и As. Далее осуществляется линейный рост оксидного слоя вглубь слоя за счет диффузии кислорода. Аналогично ведут себя оксиды металлов [10]. Рис. 6, б также демонстрирует, что при хранении структур в лабораторных условиях протекает химическая реакция с передачей кислорода от As к Ga.

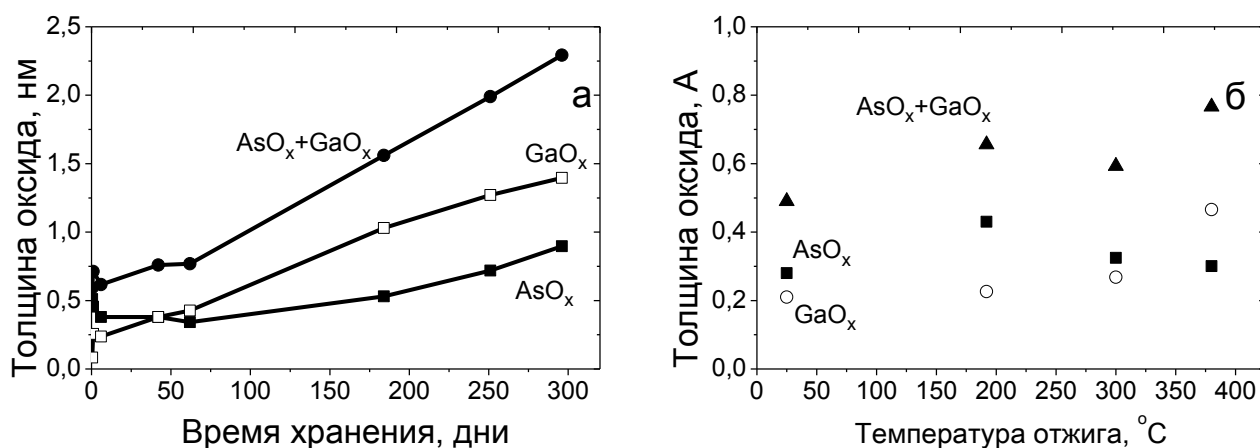


Рис. 6. а) Зависимость толщины оксидного слоя от времени хранения структур ССИД в нормальных условиях; б) зависимость толщины оксидов на НТ-GaAs от температуры отжига в условиях вакуума.

В 4 главе показывается, что свойства GaMnAs возможно изменять с использованием постростовой обработки. Например, низкотемпературный отжиг, упоминаемый в литературном обзоре как метод улучшения свойств РМП, позволяет изменять профиль распределения Mn по глубине (рис. 7, а) за счет сегрегации элементного марганца на поверхности. НТО стимулирует термодиффузию Mn_{Ga} с последующей агрегацией, и это, в свою очередь,

приводит к возрастанию концентрации MnAs в слое GaMnAs (рис. 7, б). Использование покровных слоев GaAs с избытком As ($\text{Ga}_{0,4}\text{As}_{0,6}$) позволяет избежать оксидирования слоя GaMnAs. Отмечено, что при проведении низкотемпературного отжига в условиях СВВ, когда температура варьировалась в пределах 190 – 380°C, структура такого материала уже при 190°C модифицируется. В приповерхностных слоях (до глубин 5 нм) происходит обеднение мышьяком, и соотношение Ga и As приближается к 1. В свою очередь, на гетерогранице $\text{Ga}_{0,4}\text{As}_{0,6}/\text{GaMnAs}$ материал остается неизменным.

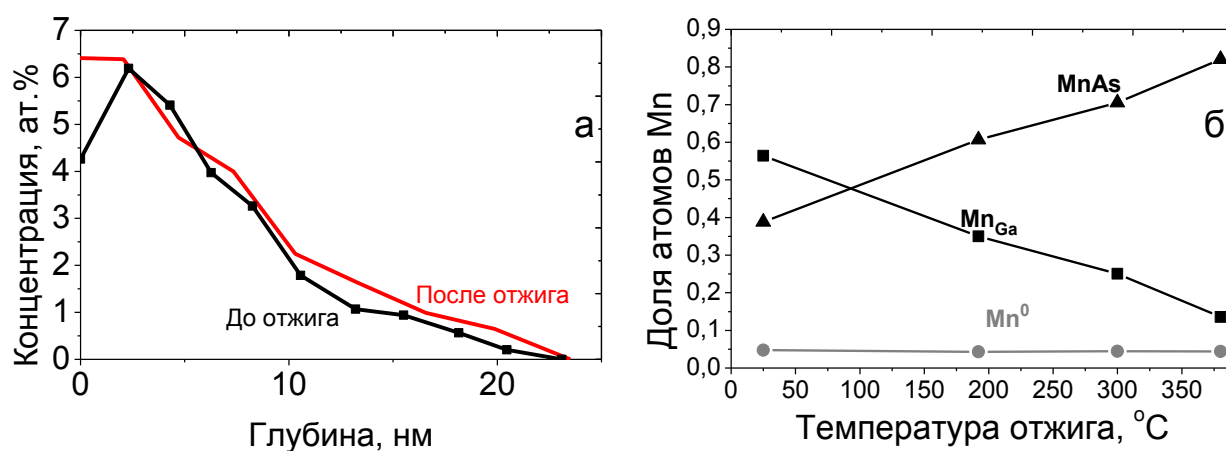


Рис. 7. а) изменение профиля распределения Mn у поверхности в результате НТО при 240°C в течение 5 часов; б) изменение концентрации марганец содержащих соединений при НТО в зависимости от температуры отжига.

Использование этих данных позволяет представить РМП GaMnAs в виде полупроводниковой матрицы, в которой присутствуют кластеры MnAs, структурные дефекты (антиструктурные дефекты, димеры мышьяка), часть атомов Ga замещены атомами Mn (локальные магнитные моменты), включения металлического Mn, часть междоузлий GaAs заняты атомами Mn. Исходя из вероятностных процессов, обязательно должны существовать области с повышенным содержанием атомов замещающего марганца, то есть атомы Mn находятся в соседних узлах элементарной ячейки, и размер этих областей может составлять единицы нанометров. При больших размерах механические

напряжения будут провоцировать перестройку решетки либо в гексагональную, либо орторомбическую. При этом наличие атомов марганца, расположенных в соседних узлах на месте галлия, будет способствовать возникновению ферромагнетизма, обусловленного двойным обменным взаимодействием [11], поскольку межатомное расстояние между атомами Mn_{Ga} будет равно расстоянию между атомами Mn в α -MnAs. Использование экспериментальных данных и результатов [12] позволяет качественно отобразить поведение марганецсодержащих соединений (рис. 8). Эти зависимости позволяют объяснить расхождение теории [13] и эксперимента при определении температуры Кюри.

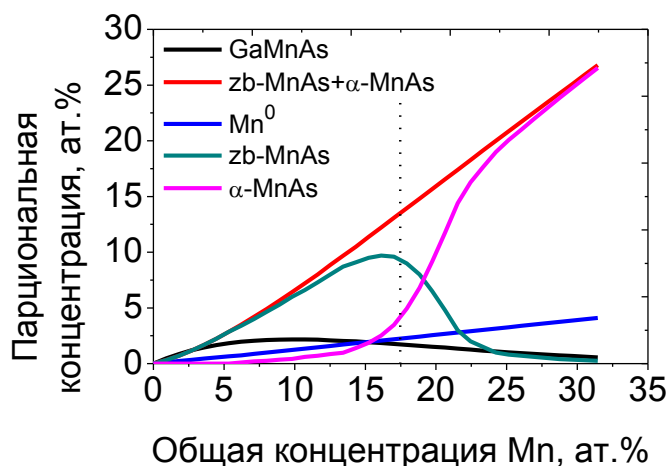


Рис. 8. Диаграмма соединений в слое GaMnAs. Для удобства на рисунке изображена сумма арсенидов с разными типами решетки. Отдельно отображена граница до которой в литературе упоминаются гомогенные слои РМП.

Существование и вид зависимостей Mn^0 , zb -MnAs+ α -MnAs и GaMnAs было определено в ходе проведения исследований, описанных в главах 3. Разделение zb -MnAs+ α -MnAs на кривые zb -MnAs и α -MnAs возможно, исходя из того, что положение ФЭ-линии от zb -MnAs зависит от размера этого включения. Применяя в этом случае перколяционную теорию, можно получить вид кривой для содержания zb -MnAs. Оставшийся Mn соответствует α -MnAs. Результаты, представленные в главе 4, указывают на изменения этой диаграммы в зависимости от условий постростовой обработки. Например, при

повышении температуры постростового отжига происходит уменьшение площадей под зависимостями GaMnAs и *zb*-MnAs, так как усиливается процесс агрегации Mn_{Ga} , что, в конечном счете, увеличивает содержание α -MnAs. Очевидно, повышение температуры роста слоев GaMnAs приводит к аналогичным результатам.

В 5 главе представлены альтернативные пути получения РМП: ионное легирование для создания системы GaMnAs, использование альтернативной примеси Fe для формирования слоев GaFeSbAs и матрицы InAs для слоев InMnAs. В работе была проанализирована система GaMnAs, полученная при облучении подложки GaAs ионами Mn^{+} с энергией 200 кэВ и дозой облучения $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Стоит заметить, что образцы были получены двумя способами. Первые создавались путем имплантации в мишень без охлаждения. При этом температура подложки достигала 600 К. Полученный профиль распределения концентрации элементов для нее представлен на рис. 9, а. Вторая группа создавалась при температуре подложки ниже комнатной, что достигалось продувкой парами жидкого азота через систему охлаждения, вмонтированную в мишень, и соответствующий профиль изображен на рис. 9, б.

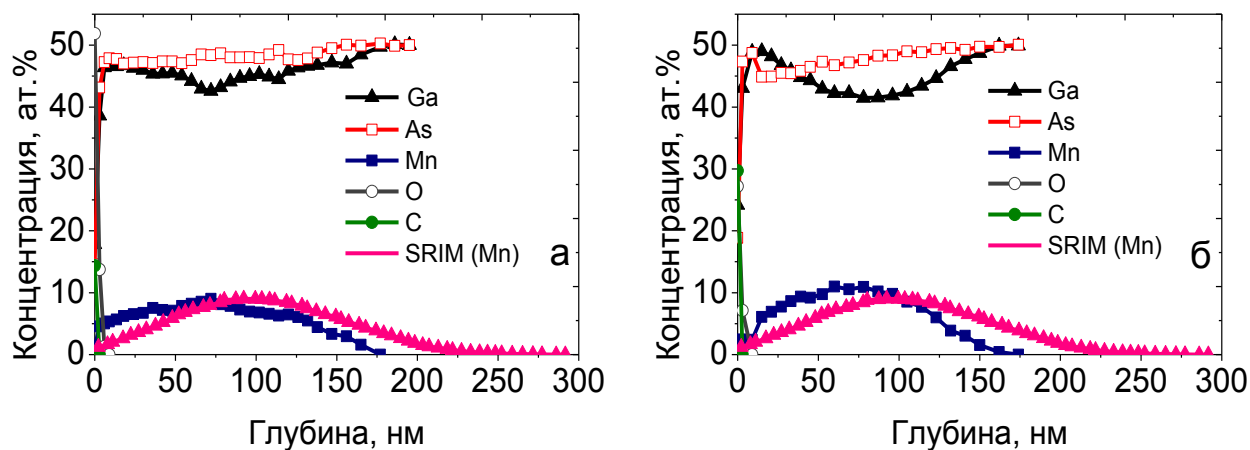


Рис. 9. Профиль распределения химических элементов по глубине после ионного легирования GaAs ионами Mn^{+} с энергией 200 кэВ и дозой облучения $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$: а) без контроля температуры; б) при продувке мишени парами жидкого азота. SRIM (Mn) - профиль распределения Mn, смоделированный SRIM [14].

Сопоставление модельного и экспериментального профилей Mn определило, что количество внедренной примеси, определенной методом РФЭС, равно модельной концентрации. Стоит отметить расхождение профилей по глубине, что связано с ионным распылением образца-мишени в процессе облучения.

Из рис. 9 видно, что охлаждение повлияло на распределение химических элементов. Так, отсутствие охлаждения структуры в процессе создания привело к возникновению в профиле распределения Mn нескольких максимумов. Такое поведение связано с термически стимулированной диффузией Mn и с возникновением в системе кластеров MnAs, в соответствии с описанными механизмами перераспределения марганца. При охлаждении образца в профиле Mn присутствует только один максимум. При этом в слое присутствует 2 области. В первой концентрация As и Mn меньше Ga, а в области максимума основным элементом является As. Таким образом, можно предположить, что облучение приводит к вытеснению Ga марганцем, и такая ситуация позволяет объяснить пространственное разделение кластеров MnAs и MnGa_y [15].

В главе описываются результаты изучения альтернативных РМП, как, например, четверной раствор GaFeAsSb. Эта система выгодно отличается от GaMnAs отсутствием кислорода в слое магнитного полупроводника (рис. 10, а).

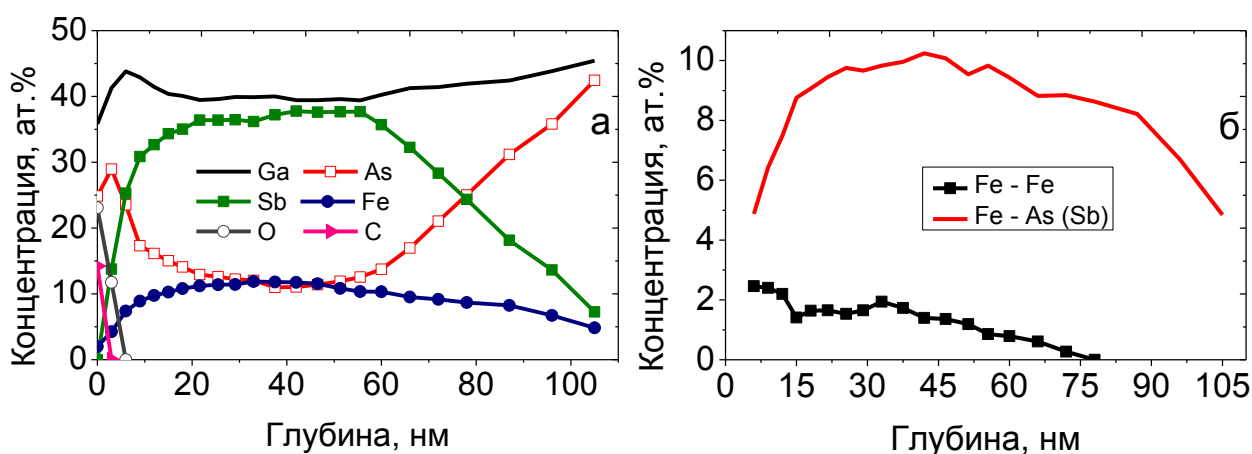


Рис. 10. Профили распределения по глубине в слое GaFeAsSb а) элементов и б) основных соединений, содержащих Fe.

Этот материал в районе гетерограницы с подложкой характеризуется содержанием элементного Fe менее 0,2 ат.% (рис. 10, б). Исследование системы позволяет говорить о достаточно высоком качестве этого материала. Тем не менее, использование GaFeAsSb является затруднительным, поскольку такого рода материалы имеют параметр решетки 0,542 – 0,607 нм, значительно превышающий значение 0,565 нм для GaAs [16]. Это, в свою очередь, затрудняет их согласование с технологией GaAs как материала, на основе которого производятся светоизлучающие структуры. Ввиду того, что это четверной раствор, в нем присутствует большое количество дефектов: примеси внедрения и вакансии. Помимо этого, на профиле распределения химических элементов (рис. 10, а) отмечается высокое содержание As в приповерхностных слоях, что указывает на высокую сегрегационную активность этого элемента.

Еще одна близкая к GaMnAs система InMnAs характеризуется аналогичным поведением химического состава, что выражается в присутствии высокой концентрации MnAs и элементного Mn в слое. В системе определяется Mn_{Ga} с низкой концентрацией на уровне всего 0,5 ат.%.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разбавленный магнитный полупроводник GaMnAs представляет собой многокомпонентную систему: а) комплекс кластеров α -MnAs с вариативным направлением намагниченности; б) области, где атомы Ga полностью замещены атомами марганца, при этом ферромагнетизм осуществляется по механизму двойного обмена; в) хаотично расположенные изолированные атомы Mn, встроенные в решетку GaAs, с максимальной концентрацией не выше 2 ат.% при общей концентрации неоксидированного Mn 7 ат.%; г) элементный марганец, являющийся суперпозицией кластеров Mn и атомов Mn, расположенных в междоузлиях GaAs; д) оксидные фазы марганца на поверхности и в приповерхностных слоях: MnO, Mn₂O₃, MnO₂.
2. Содержание соединений MnAs и MnGa_y в слоях GaMnAs, выращиваемых методом импульсного лазерного осаждения, определяется количеством газа-

носителя – арсина.

3. Низкотемпературный отжиг системы в условиях сверхвысокого вакуума приводит к сегрегации марганца на поверхности слоя GaMnAs и агрегации замещающего марганца во всем слое РМП с увеличением концентрации MnAs. Последнее обстоятельство приводит к уменьшению степени циркулярной поляризации электролюминисценции ССИД.
4. Присутствие кислорода в слое GaMnAs, выращенном методом импульсного лазерного осаждения при температурах 250 – 350°C, обусловлено диффузией кислорода с оксидированной поверхности вглубь образца.
5. Использование покровного слоя $Ga_{0,4}As_{0,6}$ для системы GaMnAs позволяет избежать проникновения кислорода в слой РМП. Отжиг $Ga_{0,4}As_{0,6}$ в условиях СВВ при температуре 190 – 380°C в течение 5 часов приводит к приближению соотношения концентрации Ga и As к 1 в приповерхностных слоях.
6. Нагрев подложки GaAs при ионном облучении Mn^+ приводит к модификации профиля распределения марганца с образованием нескольких максимумов Mn, что вызвано наличием либо механических напряжений, либо образованием химических связей, либо присутствием диффузионных барьеров.
7. На основе четверного раствора GaFeAsSb возможно формирование РМП с концентрацией элементного Fe менее 0,2 ат. %.
8. Разработанная в рамках РФЭС методика определения концентраций соединений, содержащих атомы переходных металлов, имеет относительную погрешность элементного анализа 4 – 6 % и химического 10 – 20 %.

Список цитированной литературы

- [1] Zvonkov B.N. Using laser sputtering to obtain semiconductor nanoheterostructures // B.N. Zvonkov, O.V. Vikhrova, Yu.A. Danilov, E.S. Demidov, P.B. Demina, M.V. Dorokhin, Yu.N. Drozdov, V.V. Podol'skii, M. V. Sapozhni // Journal of Optical Technology. – 2008. – V.75, №6. – P. 389–393. DOI: 10.1364/JOT.75.000389.
- [2] Количественная оже-электронная и рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия / М. П. Сих // Анализ поверхности методами оже- и

рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии / М. П. Сих [и др.]; Под ред. Д. Бриггс, М. П. Сих; Пер. с англ. А. М. Гофман [и др.]. – М.: Мир, 1987. – Гл. 5. – С. 203-243.

[3] Handbooks of monochromatic XPS spectra. Volume 1. The elements and native oxides / Ed. by B. V. Crist. – Ames, Iowa: XPS International Inc., 1999.

[4] Xu J.F. Atmospheric oxygen in Mn doped GaAs/GaAs(0 01) thin films grown by molecular beam epitaxy / J.F. Xu, P.M. Thibado, C. Awo-Affouda, R. Moore, V.P. LaBella // Journal of Crystal Growth. – 2007. – V.301-302. – P. 54–57. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2006.11.234.

[5] Numerical simulation of antiferromagnetic spin-pairing effects in diluted magnetic semiconductors and enhanced paramagnetism at interfaces / J.M. Fatah, T. Piorek, P. Harrison, T. Stirner, W.E. Hagston // Physical Review B. – 1994. – V.49, №15. – P. 10341–10344. DOI: 10.1103/PhysRevB.49.10341.

[6] Prospects for high temperature ferromagnetism in {GaMnAs} semiconductors / T. Jungwirth, K.Y. Wang, J. Mašek, K.W. Edmonds, J. König, J. Sinova, M. Polini, N.A. Goncharuk, A.H. MacDonald, M. Sawicki, R.P. Campion, L.X. Zhao, C.T. Foxon, B.L. Gallagher // Physical Review B. – 2005. – V.72. – 165204. DOI: 10.1103/PhysRevB.72.165204.

[7] О фазовом разделении в слоях GaMnAs, полученных ионной имплантацией и последующим лазерным отжигом / Е.А. Ганьшина, Л.Л. Голик, З.Э. Кунькова, Г.С. Зыков, Ю.В. Маркин, Ю.А. Данилов, Б.Н. Звонков // ФТТ. – 2019. – Т.61, №3. – С. 465–471. DOI: 10.21883/FTT.2019.03.47237.270.

[8] Формирование однофазного ферромагнитного полупроводника (Ga, Mn)As импульсным лазерным отжигом / Ю.А. Данилов, Н. Boudinov, О.В. Вихрова, А.В. Здравейцев, А.В. Кудрин, С.А. Павлов, А.Е. Парафин, Е.А. Питиримова, Р.Р. Якубов // ФТТ. – 2016. – Т.58, №11. – С. 2140–2144.

[9] 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. Здравейцев, Ю.А. Данилов, Д.Е. Николичев, А.В. Боряков, С.Ю. Зубков // ЖТФ. – 2014. – Т.84, №12. – С. 102–106.

[10] Курс теории коррозии и защиты металлов / Н.П. Жук. – Издательство «Металлургия», 1976. – 472 с.

[11] Ferromagnetism of MnAs Studied by Heteroepitaxial Films on GaAs(001) / A.K. Das, C. Pampuch, A. Ney, T. Hesjedal, L. Daweritz, R. Koch, K.H. Ploog // Physical Review Letters. – 2003. – V. 91, № 8. – 087203. DOI: 10.1103/PhysRevLett.91.087203.

[12] Intrinsically limited critical temperatures of highly doped $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ thin films / Kh. Khazen, H.J. von Bardeleben, J.L. Cantin, A. Mauger, L. Chen, J.H. Zhao // Physical Review B. – 2010. – V. 81. – 235201. DOI: 10.1103/PhysRevB.81.235201.

[13] Handbook of Spintronic Semiconductors / ed.W.M. Chen, I.A. Buyanova. – Pan Stanford Publishing Pte. Ltd, 2010. – 400p. – ISBN: 978-981-4267-36-6.

- [14] SRIM – The Stopping and Range of Ions in Matter [электронный ресурс] / J.F. Ziegler // Particle Interactions with Matter. Доступно на: <http://www.srim.org>. (дата обращения: 12.02.2010).
- [15] Couto O.D.D. Ferromagnetic nanoclusters formed by Mn implantation in GaAs / O.D.D. Couto Jr., M.J.S.P. Brasil, F. Iikawa, C. Giles, C. Adriano, J.R.R. Bortoleto, M.A.A. Pudenzi, H.R. Gutierrez, I. Danilov // Applied Physics Letters. – 2005. – V.86. – 071906. DOI: 10.1063/1.1863436.
- [16] Semiconductors: Data Handbook / ed. Prof. Dr. Otfried Madelung. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 2003. – 691p. – ISBN 978-3-642-62332-5, e-ISBN 978-3-642-18865-7, DOI 10.1007/978-3-642-18865-7.

Список опубликованных работ автора по теме диссертации

- [A1] 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, №6. – С. 839-844.
- [A2] Формирование контактов MnGa/GaAs для применений в оптоэлектронике и спинтронике / М.В. Дорохин, Д.А. Павлов, А.И. Бобров, Ю.А. Данилов, В.П. Лесников, Б.Н. Звонков, А.В. Здоровейщев, А.В. Кудрин, П.Б. Демина, Ю.В. Усов, Д.Е. Николичев, **Р.Н. Крюков**, С.Ю. Зубков // ФТП. – 2016. – Т.50, №11. – С. 1463-1468.
- [A3] High-temperature intrinsic ferromagnetism in the (In,Fe)Sb semiconductor / A.V. Kudrin, Yu.A. Danilov, V.P. Lesnikov, M.V. Dorokhin, O.V. Vikhrova, D.A. Pavlov, Yu.V. Usov, I.N. Antonov, **R.N. Kriukov**, A.V. Alaferdov, N.A. Sobolev // J. Appl. Phys. – 2017. – V.122. – 183901. DOI: 10.1063/1.5010191.
- [A4] Spectral fit refinement in XPS analysis technique and its practical applications / A.V. Boryakov, S.I. Surodin, **R.N. Kryukov**, D.E. Nikolichev, S.Yu. Zubkov // Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena. – 2018. – V.50, № 11. – P. 1443–1448. DOI: 10.1016/j.elspec.2017.11.004.
- [A5] Исследование особенностей формирования и свойств полупроводников A^3B^5 , сильно легированных железом / Ю.А. Данилов, А.В. Кудрин, В.П. Лесников, О.В. Вихрова, **Р.Н. Крюков**, И.Н. Антонов, Д.С. Толкачев, А.В. Алафердов, З.Э. Кунькова, М.П. Темирязева, А.Г. Темирязов // ФТТ. – 2018. – Т.60, №11. – С. 2137 – 2140. – DOI: 10.21883/FTT.2018.11.46653.07NN.

Тезисы докладов конференций

- [A6] Исследование систем спиновых светоизлучающих диодов со слоем ферромагнитного полупроводника GaMnAs методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии / **Р.Н. Крюков**, А.В. Боряков // 15-я всероссийская молодежная конференция. Физика полупроводников и наноструктур, полупроводниковая опто- и наноэлектроника: тезисы докладов, г. Санкт-Петербург, 25-29 ноября. – 2013. – С.83.
- [A7] Исследование системы спинового светоизлучающего диода методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии / **Р.Н. Крюков**, Д.Е. Николичев, А.В. Боряков // Третья школа молодых ученых по физике

наноструктурированных и кристаллических материалов: конспекты лекций и тезисы докладов, г. Нижний Новгород, 15-17 мая. – 2014 г. – С.137-138.

[A8] Химический состав структур спиновых светоизлучающих диодов на основе GaAs / Д.Е. Николичев, А.В. Боряков, **Р.Н. Крюков**, М.В. Дорохин // Тезисы докладов XXV Российская конференция по электронной микроскопии «РКЭМ-2014»: тезисы докладов, г. Черноголовка, 2-7 июня. – 2014 г. – Т.1. – С. 254-255.

[A9] Chemical and phase composition of GaMnAs/GaAs/InGaAs spin light emitting diodes / D.E. Nikolichev, A.V. Boryakov, **R.N. Kryukov**, M.V. Dorokhin, A.V. Kudrin, E.A. Semenov // IV International Scientific Conference – STRANN 2014: Abstracts, г. Санкт-Петербург, 22-25 апреля. – 2014 г. – С.97-99.

[A10] 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. Ведь, Ю.А. Данилов, И.В. Ерофеева, **Р.Н. Крюков**, Д.Е. Николичев // XIX Международный Симпозиум «Нанопизика и нанопэлектроника»: труды, г. Нижний Новгород, 10-14 марта. – 2015 г. – Т.1. – С. 168–169.

[A11] Электронно-лучевое послойное осаждение CoPt на поверхность InGaAs/GaAs гетероструктуры / М.В. Ведь, П.Б. Демина, М.В. Дорохин, А.В. Здоровейщев, **Р.Н. Крюков**, А.В. Кудрин // XV конференция «Высокочистые вещества и материалы: получение, анализ, применение»: тезисы докладов, г. Нижний Новгород, 26-29 мая. – 2015 г. – С. 113.

[A12] Модифицирование свойств ферромагнитных слоев на основе соединений A^3B^5 импульсным лазерным отжигом / О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, Б.Н. Звонков, **Р.Н. Крюков**, А.В. Кудрин, В.П. Лесников, А.В. Нежданов, Д.Е. Николичев, С.А. Павлов, А.Е. Парафин, И.Ю. Панешкин, С.М. Планкина // XXI Международный Симпозиум «Нанопизика и нанопэлектроника»: труды, г. Нижний Новгород, 13-16 марта. – 2017 г. – Т.1. – С.151-152.

[A13] Однофазные эпитаксиальные слои InFeSb с температурой Кюри выше комнатной / А.В. Кудрин, Ю.А. Данилов, В.П. Лесников, Д.А. Павлов, Ю.В. Усов, Е.А. Питиримова, И.Н. Антонов, О.В. Вихрова, А.В. Алафердов, **Р.Н. Крюков** // XXI Международный Симпозиум «Нанопизика и нанопэлектроника»: труды, г. Нижний Новгород, 13-16 марта. – 2017 г. – Т.1. – С.195-196.

[A14] Влияние низкотемпературного отжига на перераспределение химического состава системы спинового светоизлучающего диода на основе GaAs с дельта-слоем Mn / Д.Е. Николичев, **Р.Н. Крюков**, С.Ю. Зубков, М.В. Дорохин, П.Б. Демина, Б.Н. Звонков // XXI Международный Симпозиум «Нанопизика и нанопэлектроника»: труды, г. Нижний Новгород, 13-16 марта. – 2017 г. – Т.1. – С.217-218.

[A15] Свойства поверхности слоев GaAs:Mn, выращенных методом импульсного лазерного осаждения / С.Ю. Зубков, Д.Е. Николичев, **Р.Н. Крюков**, М.В. Дорохин, Б.Н. Звонков // XXI Международный Симпозиум

«Нанозифизика и нанозлектроника»: труды, г. Нижний Новгород, 13-16 марта. – 2017 г. – Т.2. – С.606-607.

[A16] The formation of the array of indium nanoislands by the laser deposition in vacuum / A.V. Kudrin, V.P. Lesnikov, **R.N. Krukov** // NaNaX 8 – nanoscience with Nanocrystals, Португалия, г. Брага, 3-7 июля. – 2017.

[A17] Ferromagnetism of indium antimonide, highly doped by iron / A.V. Kudrin, Yu.A. Danilov, V.P. Lesnikov, O.V. Vikhrova, D.A. Pavlov, Yu.V. Usov, E.A. Pitirimova, I.N. Antonov, **R.N. Kryukov** // Moscow International Symposium on Magnetism: Book of Abstract, Россия, г. Москва, 1-5 июля. – 2017. – P.873.

[A18] High-temperature intrinsic ferromagnetism in the InFeSb semiconductor / A.V. Kudrin, Yu.A. Danilov, V.P. Lesnikov, O.V. Vikhrova, D.A. Pavlov, Yu.V. Usov, E.A. Pitirimova, I.N. Antonov, **R.N. Kryukov** // III International Conference on Modern Problems in Physics of Surfaces and Nanostructures: Book of Abstracts, Россия, г. Ярославль, 9-11 октября. – 2017. – P.61.

[A19] Исследование особенностей формирования и свойств полупроводников A^3B^5 , сильно легированных железом / Ю.А. Данилов, А.В. Кудрин, В.П. Лесников, О.В. Вихрова, **Р.Н. Крюков**, И.Н. Антонов, Д.С. Толкачев // XXII Международный Симпозиум «Нанозифизика и нанозлектроника»: труды, г. Нижний Новгород, 12-15 марта. – 2018 г. – Т.1. – С.180-181.

[A20] Химический состав разбавленного магнитного полупроводника InMnAs / С.Ю. Зубков, **Р.Н. Крюков**, Д.Е. Николичев, М.В. Дорохин, Б.Н. Звонков // XXII Международный Симпозиум «Нанозифизика и нанозлектроника»: труды, г. Нижний Новгород, 12-15 марта. – 2018 г. – Т.1. – С.200-201.

[A21] Топография и состав ферромагнитных слоев GaFeSb, выращенных импульсным лазерным осаждением / **Р.Н. Крюков**, Д.Е. Николичев, А.В. Боряков, Ю.А. Данилов, В.П. Лесников, С.Ю. Зубков // XXII Международный Симпозиум «Нанозифизика и нанозлектроника»: труды, г. Нижний Новгород, 12-15 марта. – 2018 г. – Т.1. – С.210-211.

[A22] Изменение топографии и состава слоев GaMnAs в результате отжига эксимерным лазером / Д.Е. Николичев, **Р.Н. Крюков**, С.Ю. Зубков, Ю.А. Данилов, В.П. Лесников, А.Е. Парафин // XXII Международный Симпозиум «Нанозифизика и нанозлектроника»: труды, г. Нижний Новгород, 12-15 марта. – 2018 г. – Т.1. – С.237-238.

[A23] Определение состава твердых растворов GaInAs и GaInP из данных спектроскопии комбинационного рассеяния света / С.М. Планкина, А.В. Боряков, О.В. Вихрова, Б.Н. Звонков, С.Ю. Зубков, **Р.Н. Крюков**, А.В. Нежданов, И.Ю. Пашенькин // XXII Международный Симпозиум «Нанозифизика и нанозлектроника»: труды, г. Нижний Новгород, 12-15 марта. – 2018 г. – Т.2. – С.731-732.

[A24] Физико-химические свойства слоев разбавленных магнитных полупроводников, выращенных методом импульсного лазерного осаждения / **Р.Н. Крюков**, Д.Е. Николичев, А.В. Боряков, Ю.А. Данилов, В.П. Лесников, С.Ю. Зубков // XXVII Российская конференция по электронной микроскопии

«РКЭМ-2018»: тезисы докладов, г. Черноголовка, 28-30 августа. – 2018 г. –Т.1. – С.54-55.

[A25] Состав и структура слоев GaMnAs, выращенных методом импульсного лазерного осаждения / Д.Е. Николичев, **Р.Н. Крюков**, Ю.В. Усов, Д.А. Павлов, М.В. Дорохин, Б.Н. Звонков, С.Ю. Зубков // XXVII Российская конференция по электронной микроскопии «РКЭМ-2018»: тезисы докладов, г. Черноголовка, 28-30 августа. – 2018 г. – Т.2. – С.349-350.

Учебно-методические пособия

[A26] Д.Е. Николичев, А.В. Боряков, С.И. Суродин, **Р.Н. Крюков** Анализ твердотельных гетеронаносистем методом РФЭС: учебно-методическое пособие – Н. Новгород: ННГУ, 2013, 50 с. [Электронный ресурс]. URL: (дата обращения: 10.06.2019).