

На правах рукописи



КУЗЬМИНА АЛИНА СЕРГЕЕВНА

СТРУКТУРА И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКОПЛЁНОЧНЫХ  
РАЗБАВЛЕННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ  
НА ОСНОВЕ ОКСИДА ЦИНКА, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ  
ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ОСАЖДЕНИЯ

Специальность 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Иркутск – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования **«Иркутский национальный исследовательский технический университет»**

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук  
**Шнейдер Александр Георгиевич**

Официальные оппоненты: **Балаев Дмитрий Александрович**  
доктор физико-математических наук, доцент,  
Институт физики им. Л. В. Киренского  
Сибирского отделения Российской академии наук –  
обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН,  
директор

**Семенов Андрей Леонидович**  
кандидат физико-математических наук, доцент,  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Иркутский государственный университет»,  
доцент кафедры радиофизики и радиоэлектроники

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
**«Московский технологический университет»**

Защита состоится **«18» октября 2017 г. в 14<sup>00</sup>** на заседании диссертационного совета Д 212.074.04 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский государственный университет» по адресу: 664003, г. Иркутск, бульвар Гагарина, д. 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский государственный университет» и на сайте: <http://isu.ru/>.

Автореферат разослан **«\_\_» июля 2017 г.**

Отзывы на автореферат (в 2-х экземплярах, заверенные печатью организации) просьба выслать по адресу: 664003, г. Иркутск, бульвар Гагарина, д. 20; учёному секретарю диссертационного совета Д 212.074.04 Мангазееву Б.В., e-mail: [mangazeev@yandex.ru](mailto:mangazeev@yandex.ru).

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 212.074.04,  
кандидат физико-математических наук,  
доцент

Мангазеев  
Борис Викторович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертационная работа посвящена исследованию структурных, электрических, магнитных, магнитотранспортных и магнитооптических свойств тонкоплёночных разбавленных магнитных полупроводников на основе оксида цинка, синтезированных методом импульсного лазерного осаждения. Эти материалы представляют интерес для создания элементной базы и устройств полупроводниковой спинтроники.

**Актуальность темы научного исследования.** Микроэлектроника являлась одним из наиболее сильных, решающих факторов, определивших научно-технический прогресс и развитие экономики стран во второй половине XX века. Однако по оценкам многих учёных и специалистов в ближайшие несколько десятилетий без концептуальных решений микроэлектроника резко снизит темпы развития. Основными причинами этого являются технологические трудности (предел миниатюризации (1–10 нм) и плотности ( $\sim 10^9$  см<sup>-2</sup>) электронных элементов, высокое энергопотребление и тепловыделение наноструктур, проблема нанесения металлических контактов, усложнение схемотехнических решений, высокая стоимость производства) и фундаментальные физические ограничения (атомная природа вещества, туннельный эффект).

Одним из перспективных направлений развития микроэлектроники в XXI веке является *полупроводниковая спинтроника*, в которой наряду с зарядом электрона используется и его спин (собственный момент импульса). Полупроводниковая спинтроника открывает возможность создания базовых элементов, расширяющих функциональные возможности уже существующих устройств, а также позволяющих производить электронные приборы, основанные на принципиально новых эффектах и явлениях (магниторезистивная память; квантовый компьютер; спиновые транзисторы, вентили, магнитные сенсоры). Спинтронные устройства обладают быстротой и энергоэффективностью за счёт того, что спин электрона может быть переведён из одного состояния в другое с меньшими затратами энергии и за меньшее время, чем требуется на перемещение заряда. Кроме того, поскольку при смене спина не меняется кинетическая энергия носителя заряда, то выделения тепла практически не происходит.

Основной задачей современного этапа развития полупроводниковой спинтроники является *интеграция магнитных систем в микроэлектронику*. Для её выполнения необходима разработка новых многофункциональных материалов, имеющих высокую концентрацию носителей заряда, низкое удельное сопротивление, ферромагнитное упорядочение и колоссальное магнитосопротивление при комнатной температуре и в слабых магнитных полях. Несмотря на то, что исследования в области спинтроники ведутся уже около тридцати лет, физическая природа возникновения этих параметров, а также вопросы их временной стабильности до конца остаются невыясненными, что затрудняет переход к массовому производству материалов и устройств спинтроники.

*Тонкоплёночные разбавленные магнитные полупроводники (РМП) на основе оксида цинка* являются основными кандидатами для удовлетворения многих требований, предъявляемых к материалам полупроводниковой спинтроники. В связи с достаточно высокой растворимостью ионов (до нескольких десятков процентов), в этих полупроводниковых соединениях появляется возможность для управления их магнитными, электрическими, магнитотранспортными и магнитооптическими свойствами в широком диапазоне концентраций легирующих элементов. Ожидается, что существенный вклад для достижения необходимых параметров будет вносить полупроводниковая матрица – *оксид цинка*, который обладает рядом достоинств: большой энергией связи экситонов (60 мэВ); высокой прозрачностью в видимой и инфракрасной областях спектра; твёрдостью; химической, термической, радиационной стойкостью и нетоксичностью.

*Импульсное лазерное осаждение (ИЛО)* является одним из лучших современных методов контролируемого синтеза тонкоплёночных РМП. Это обусловлено высокой степенью соответствия катионной стехиометрии формируемых плёнок составу материала мишени, высокой скоростью осаждения, морфологической однородностью синтезированных плёнок, полным отсутствием загрязнений плёнки компонентами материалов вакуумной камеры, а также простотой легирования образцов.

Таким образом, *актуальность темы исследования* заключается в создании методом ИЛО тонкоплёночных РМП на основе оксида цинка с параметрами, оптимальными для разработки элементной базы и устройств полупроводниковой спинтроники и, как следствие, решения проблем современной микроэлектроники.

*Целью работы* является расширение существующих представлений о структуре и физических свойствах тонких плёнок  $Zn_{1-x}Co_xO_y$ ,  $Zn_{1-x}Mn_xO_y$ ,  $Zn_{1-x}Li_xO_y$ , полученных методом ИЛО на сапфировых подложках *c*-ориентации, в зависимости от условий синтеза, внешних воздействий, толщины плёнок и концентрации легирующих элементов.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие *задачи*:

1. Получение методом ИЛО тонких плёнок  $Zn_{1-x}Co_xO_y$  ( $x = 0-0,42$ ),  $Zn_{1-x}Mn_xO_y$  ( $x = 0-0,08$ ),  $Zn_{1-x}Li_xO_y$  ( $x = 0-0,06$ ), обладающих низкой шероховатостью поверхностей.

2. Исследование особенностей электрических свойств тонких плёнок  $Zn_{1-x}Co_xO_y$ ,  $Zn_{1-x}Mn_xO_y$ ,  $Zn_{1-x}Li_xO_y$ , а также разработка методики получения тонких плёнок  $Zn_{1-x}Li_xO_y$  с высокой концентрацией дырок, стабильной во времени.

3. Определение физической природы высокотемпературного ферромагнетизма в тонких плёнках  $Zn_{1-x}Co_xO_y$ ,  $Zn_{1-x}Mn_xO_y$ ,  $Zn_{1-x}Li_xO_y$ .

4. Установление причин возникновения отрицательного колоссального магнитосопротивления в тонких плёнках  $Zn_{1-x}Mn_xO_y$ .

5. Изучение состава и морфологии поверхности керамических мишеней  $ZnO-Co_3O_4$  до и после лазерной абляции эксимерным KrF-лазером.

6. Анализ результатов исследований тонких плёнок  $Zn_{1-x}Co_xO_y$ ,  $Zn_{1-x}Mn_xO_y$ ,  $Zn_{1-x}Li_xO_y$  и мишеней  $ZnO-Co_3O_4$  и их сопоставление с существующими теоретическими моделями и экспериментальными данными.

**Научная новизна результатов**, полученных в ходе выполнения диссертационной работы, состоит в следующем:

- Впервые обнаружен и объяснён низкотемпературный эффект отрицательного колоссального магнитосопротивления в тонких плёнках  $Zn_{1-x}Mn_xO_y$  ( $x = 0,02-0,08$ ), который усиливается при снижении температуры и при увеличении концентрации марганца (до 225 % при  $T = 1,4$  К).

- Впервые обнаружен и объяснён рост увеличения подвижности электронов в тонких плёнках  $Zn_{1-x}Co_xO_y$  при  $0,24 \leq x \leq 0,42$ .

- Разработана методика получения тонких плёнок  $Zn_{1-x}Li_xO_y$  ( $x = 0-0,06$ )  $p$ -типа проводимости с относительно высокой концентрацией носителей заряда ( $n_h \sim 10^{18}$  см<sup>-3</sup>), стабильной во времени.

- Впервые обнаружено радиальное распределение элементов в керамических мишенях  $ZnO-Co_3O_4$  после лазерной абляции эксимерным KrF-лазером.

- Впервые установлено, что после лазерной абляции эксимерным KrF-лазером на поверхности керамических мишеней  $ZnO-Co_3O_4$  формируются конусообразные структуры и микровискеры, ориентированные к центру мишеней.

**Практическая значимость работы** заключается в получении методом ИЛО тонкоплёночных РМП на основе оксида цинка со стабильными характеристиками, которые могут быть использованы для создания новых энергоэффективных и быстродействующих устройств полупроводниковой спинтроники. Предполагается, что разработанная методика получения тонких плёнок  $Zn_{1-x}Li_xO_y$   $p$ -типа может быть применена для синтеза других тонкоплёночных РМП с дырочной проводимостью. Результаты исследований могут быть использованы в организациях, которые занимаются синтезом оксидных материалов для полупроводниковой индустрии (ООО «Элмос»; ООО «Изовак»; ОАО «Полема»; ООО «Элитех» и др.), а также в процессе подготовки студентов, обучающихся по специальностям «Электроника и нанoeлектроника», «Нанотехнологии и микросистемная техника».

**Методология и методы исследования.** Объектом исследования являлись структура и свойства тонкоплёночных РМП на основе оксида цинка; предметом исследования – особенности и закономерности изменения структуры и свойств тонких плёнок  $Zn_{1-x}Co_xO_y$ ,  $Zn_{1-x}Mn_xO_y$ ,  $Zn_{1-x}Li_xO_y$ , синтезированных методом ИЛО на сапфировых подложках  $c$ -ориентации. Для проведения исследований применялись следующие методы анализа: рентгеновская дифракция, атомно-силовая микроскопия, растровая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ, интерференционный метод измерения толщины плёнок, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия,

масс-спектрометрия вторичных ионов, метод холловских измерений, вибрационная магнитометрия, магнитооптическая спектроскопия. Синтез и измерения образцов проведены с использованием оборудования Гонконгского университета науки и технологии (HKUST), Института проблем лазерных и информационных технологий РАН (ИПЛИТ РАН), Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (МГУ) и Иркутского национального исследовательского технического университета (ИРНИТУ). Обработка и визуализация данных осуществлялись с помощью пакета программ «MS Excel» и «Origin».

***Положения, выносимые на защиту:***

1. Метод импульсного лазерного осаждения позволяет получать на сапфировых подложках *c*-ориентации тонкие плёнки  $Zn_{1-x}Co_xO_y$  ( $x = 0-0,42$ ),  $Zn_{1-x}Mn_xO_y$  ( $x = 0-0,08$ ),  $Zn_{1-x}Li_xO_y$  ( $x = 0-0,06$ ), которые во всём диапазоне  $x$  сохраняют кристаллическую структуру вюрцита, ориентированную вдоль направления (001), и обладают низкой шероховатостью поверхностей.

2. Особенности зависимостей концентрации и подвижности электронов от содержания кобальта в тонких плёнках  $Zn_{1-x}Co_xO_y$  ( $x = 0-0,42$ ), полученных методом ИЛО на сапфировых подложках *c*-ориентации, обусловлены глубиной залегания примесных уровней в запрещённой зоне ZnO и плотностью вакансий кислорода.

3. Высокотемпературный ферромагнетизм в тонких плёнках  $Zn_{1-x}Co_xO_y$  ( $x = 0,13-0,42$ ),  $Zn_{1-x}Mn_xO_y$  ( $x = 0-0,08$ ),  $Zn_{1-x}Li_xO_y$  ( $x = 0,02-0,06$ ), полученных методом ИЛО на сапфировых подложках *c*-ориентации, имеет различную природу и усиливается с ростом количества кластеров металлического кобальта, Mn–V<sub>O</sub>–Mn поляронов и дефектов внедрения Li<sub>i</sub>.

4. Эффект отрицательного колоссального магнитосопротивления в тонких плёнках  $Zn_{1-x}Mn_xO_y$  ( $x = 0,02-0,08$ ), полученных методом ИЛО на сапфировых подложках *c*-ориентации, усиливается при увеличении атомной концентрации марганца и снижении температуры ( $50\text{ K} \geq T \geq 1,4\text{ K}$ ).

5. Кратковременный послеростовой отжиг тонких плёнок  $Zn_{1-x}Li_xO_y$  ( $x = 0-0,06$ ), синтезированных методом ИЛО на сапфировых подложках *c*-ориентации, последовательно в потоках аргона и кислорода с промежуточной закалкой в деионизированной воде приводит к смене типа проводимости образцов с электронного на дырочный со стабильной во времени концентрацией носителей заряда.

***Достоверность*** научных результатов, представленных в диссертационной работе, обеспечивается их воспроизводимостью, использованием апробированных методов анализа и современного сертифицированного оборудования, а также сходимостью полученных данных с существующими теоретическими моделями и опубликованными экспериментальными данными.

***Апробация результатов работы.*** Материалы диссертационной работы были представлены на следующих всероссийских и международных научных

мероприятиях: I российском кристаллографическом конгрессе «От конвергенции наук к природоподобным технологиям» (г. Москва, 2016 г.); VII международной научной конференции «Актуальные проблемы физики твёрдого тела (ФТТ–2016)» (г. Минск, 2016 г.); VII байкальской международной конференции «Магнитные материалы. Новые технологии» (п. Листвянка, 2016 г.); XIV международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы современной науки» (г. Санкт-Петербург, 2016 г.); V всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Перспективы развития технологии переработки углеводородных, растительных и минеральных ресурсов» (г. Иркутск, 2015 г.); II всероссийской молодёжной научно-практической конференции с международным участием «Инновации в материаловедении» (г. Москва, 2015 г.); всероссийской выставке научно-технического творчества молодёжи (г. Москва, 2014 г.; *медаль ВВЦ «За успехи в научно-техническом творчестве»*); X всероссийской научно-практической конференции молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов» (г. Москва, 2013 г.); конкурсе «Изобретатель XXI века» всероссийского фестиваля науки (г. Иркутск, 2013 г.; *I место в номинации «Лучший научно-исследовательский проект»*); XII международной научно-практической конференции «Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение» (г. Саранск, 2013 г.); XIV всероссийской научно-практической школе–семинаре «Проблемы физики конденсированного состояния вещества» (г. Екатеринбург, 2013 г.).

**Личный вклад автора.** Автором лично или при его непосредственном участии выполнен анализ литературных данных, подготовлены сапфировые подложки, синтезированы керамические мишени и тонкие плёнки на основе ZnO и исследованы их структура и свойства. Обработка, систематизация и интерпретация большинства полученных экспериментальных данных проводилась автором. Автор также принимал активное участие в апробации результатов исследований и написании научных статей.

*Работа выполнена при финансовой поддержке* Российского фонда фундаментальных исследований (№ 15–32–50690 мол\_нр; 2015 г.), Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по программе «УМНИК» (№ 1986ГУ1/2014, № 6157ГУ2/2015; 2014–2015 гг.), а также ОК «РУСАЛ» для прохождения научной стажировки в HKUST (2013 г.).

**Публикации.** Основное содержание диссертационной работы отражено в 15 публикациях, в числе которых 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ, и 11 публикаций в материалах международных и всероссийских научно-практических конференций и других изданиях.

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 238 наименований и 1 приложения. Работа изложена на 180 страницах, содержит 68 рисунков и 12 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

*Во введении* сформулированы цель и решаемые задачи, обоснована актуальность темы исследования, указаны научная новизна и практическая значимость работы, представлены сведения о методах исследования образцов, о личном вкладе автора в исследования, о степени достоверности и апробации результатов, а также положения, выносимые на защиту.

*Первая глава* посвящена обзору современного состояния исследований свойств тонкоплёночных РМП на основе оксида цинка, которые обуславливают возможность применения этих материалов для создания устройств полупроводниковой спинтроники. Дано описание истории становления спиновой электроники, её основных направлений развития, научного и практического потенциалов. Особое внимание уделено характерным признакам полупроводниковой спинтроники, хронологии экспериментальных открытий, заложенных в её основу. Отмечено, что изучение РМП на основе оксида цинка вызывает интерес исследователей во всём мире, что подтверждено представленной динамикой публикационной активности по теме «тонкие плёнки ZnO» за последние 20 лет, а также диаграммой, отражающей количество публикаций по наноструктурам на основе ZnO, легированных различными элементами (2009–2014 гг.). Приведены общая характеристика оксида цинка, определение тонких плёнок и их классификация. Метод ИЛО отмечен как один из наиболее подходящих методов роста тонких плёнок, что обусловлено рядом указанных достоинств. Описаны тепловая модель взаимодействия лазерного излучения с полупроводниковым материалом и обобщённая модель роста нитевидных структур по механизму «пар–жидкость–кристалл». Осуществлён анализ современного состояния по вопросам изучения высокотемпературного ферромагнетизма, электрических свойств и отрицательного магнитосопротивления РМП на основе оксида цинка. Определено, что для широкого практического применения тонкоплёночных РМП на основе оксида цинка существуют трудности, связанные с недостаточным объёмом знаний, касающихся причин возникновения в них высокотемпературного ферромагнетизма, стабильной во времени проводимости  $p$ -типа с высокой концентрацией носителей заряда, а также колоссального магнитосопротивления при комнатной температуре и в слабых магнитных полях.

*Во второй главе* описаны схема процесса ИЛО и возможности экспериментальных установок ИЛО (комплексной установки PLD–450 и установки на базе ВУП–5). Изложены методика подготовки сапфировых подложек к процессу осаждения тонких плёнок, условия твердофазного синтеза керамических мишеней, а также условия синтеза методом ИЛО тонких плёнок  $Zn_{1-x}Co_xO_y$ ,  $Zn_{1-x}Mn_xO_y$  и  $Zn_{1-x}Li_xO_y$ . Описаны используемые физические методы исследования тонких плёнок и мишеней на основе оксида цинка, которые позволяют определять морфологию поверхности, толщину, элементный и фазовый состав, кристаллическую структуру образцов, а также получать информацию об их электрических, магнитных, магнитотранспортных и магнитооптических свойствах.

**В третьей главе** представлены результаты исследования структурных, электрических, магнитных и магнитооптических свойств тонких плёнок  $Zn_{1-x}Co_xO_y$  ( $x = 0-0,42$ ), полученных методом ИЛО на сапфировых подложках  $c$ -ориентации.

Прежде чем приступить к рассмотрению этих результатов целесообразно рассмотреть влияние ИЛО на состав и морфологию керамических мишеней  $ZnO-Co_3O_4$  ( $C(Co) = 0-45$  ат. %), синтезированных методом твердофазной реакции, после лазерной абляции. Это является важным для контроля характеристик синтезируемых материалов, для проверки соответствия стехиометрии формируемых плёнок составу материала мишени, а также для получения информации о нано- и микроструктурах, сформированных на поверхности мишеней, и развития технологии лазерной модификации поверхности полупроводников. Интерес представляет радиальное распределение элементов в мишенях  $ZnO-Co_3O_4$  после лазерной абляции (рисунок 1). Обнаружено, что атомная концентрация кобальта в центре ( $C(Co)_{\text{спектр 1}}$ ) в несколько раз превышает его концентрацию на краю мишеней ( $C(Co)_{\text{спектр 4}}$ ), что объяснено в рамках тепловой модели взаимодействия лазерного излучения с полупроводником.

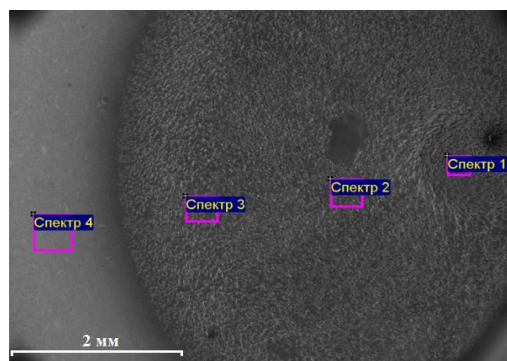


Рисунок 1 – Морфология поверхности мишени  $ZnO-Co_3O_4$  ( $C(Co) = 14,1$  ат. %) после лазерной абляции

Анализ морфологии мишеней  $ZnO-Co_3O_4$  показал, что рельеф поверхности их центральной и средней (вблизи середины радиуса) частей во время процесса абляции претерпевает существенные изменения. При воздействии лазерного излучения одинакового по длительности и энергии импульсов на мишенях разной стехиометрии формируются конусообразные структуры («конусы»), ориентированные к их центрам (рисунок 2 а). Причём, чем больше концентрация легирующей примеси в мишени, тем большее количество структур наблюдается на поверхности. При увеличении длительности воздействия лазера из «конусов» формируются нитевидные кристаллы (микровискеры) диаметром 2–5 мкм и длиной 40–75 мкм, на вершинах которых расположены закристаллизовавшиеся капли (глобулы) катализатора (рисунок 2 б). Образование «конусов» и микровискеров, ориентированных к центру мишеней, объяснено в рамках обобщённой модели роста нитевидных структур по механизму «пар–жидкость–кристалл», которая одновременно учитывает процессы адсорбции, десорбции, нуклеации и диффузии атомов. Вблизи центра мишеней атомы кобальта объединяются и, достигая определённого размера, образуют капли катализатора, способные инициировать рост микроструктур. Частицы вещества поступают в расплав каплей из паровой фазы и с поверхности мишеней, растворяются, а затем, пересыщая капли, кристаллизуются под ними в конусообразной форме. Уменьшение радиуса нитевидных структур происходит в связи с уменьшением объёма (радиуса) капли катализатора в ходе её испарения.

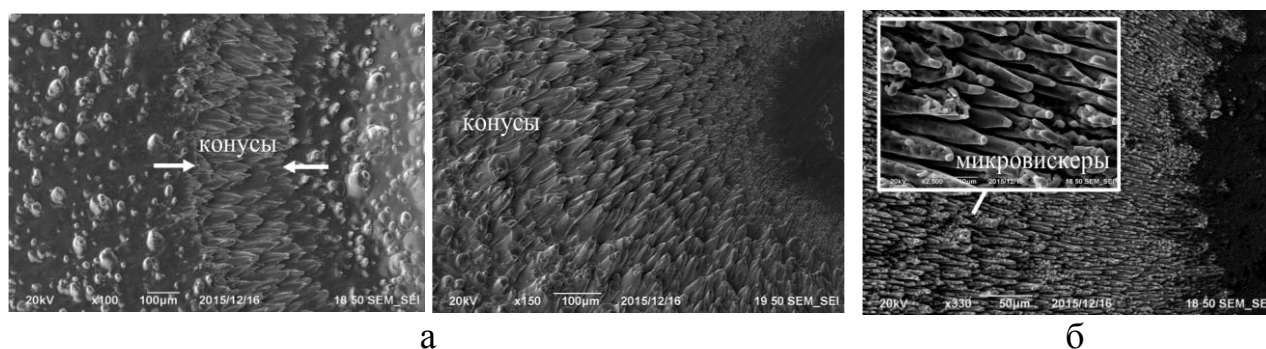


Рисунок 2 – Морфология поверхности мишеней  $ZnO-Co_3O_4$  вблизи их центра после лазерной абляции: а) слева –  $C(Co) = 3,2$  ат. %, справа –  $C(Co) = 11,4$  ат. % (1 плёнка из мишени); б)  $C(Co) = 29$  ат. % (6 плёнок из мишени); на вставке – область при увеличении  $\times 2500$

Методом ИЛО получены тонкие плёнки  $Zn_{1-x}Co_xO_y$  ( $x = 0-0,42$ ), обладающие низкой шероховатостью поверхности ( $R_a < 4$  нм). Определено, что все синтезированные плёнки  $Zn_{1-x}Co_xO_y$  ( $x = 0-0,42$ ) содержат в качестве основной фазы ZnO со структурой вюрцита, ориентированной вдоль оси  $c$ . При увеличении концентрации Co в  $Zn_{1-x}Co_xO_y$  параметр  $c$  кристаллической решётки ZnO уменьшается по закону близкому к закону Вегарда. Причиной этого является «натяжение» кристаллической решётки в плоскости плёнок, происходящее за счёт замещения ионов Zn ионами Co меньшего радиуса ( $r[Zn^{2+}] = 0,074$  нм;  $r[Co^{2+}] = 0,072$  нм), а также с уменьшением кислородных вакансий ( $y \rightarrow 1$  при  $x \rightarrow 1$ ), т.е. приближением к стехиометрическому росту плёнок  $Zn_{1-x}Co_xO_y$ . При  $x > 0,1$  тройной раствор  $Zn_{1-x}Co_xO_y$  становится перенасыщенным с образованием новой фазы – металлического кобальта гексагональной структуры ( $a = 2,503$  Å,  $c = 4,060$  Å). Дальнейшее увеличение концентрации кобальта приводит к окислению металлического кобальта и формированию парамагнитной фазы  $Co_3O_4$  кубической структуры ( $a = 8,084$  Å).

Установлено, что все тонкие плёнки  $Zn_{1-x}Co_xO_y$  при комнатной температуре обладают проводимостью  $n$ -типа и достаточно высокой концентрацией носителей заряда ( $n_e \sim 10^{19}$  см $^{-3}$ ), которая с ростом  $x$  убывает экспоненциально (рисунок 3), что связано с глубоким залеганием энергетических уровней кобальта в запрещённой зоне ZnO и, как следствие, невозможностью кобальта участвовать в проводимости.

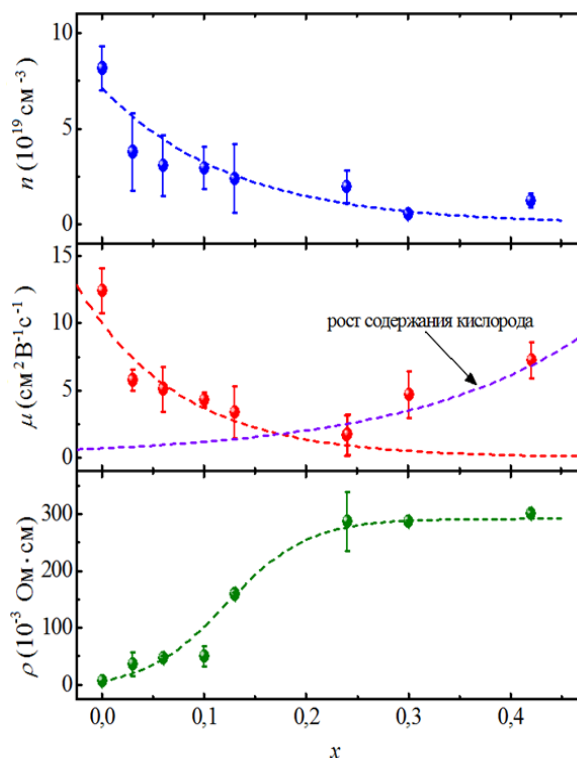


Рисунок 3 – Зависимости электрических характеристик плёнок  $Zn_{1-x}Co_xO_y$  от концентрации кобальта при  $T = 298$  К

Определено, что подвижность электронов в тонких плёнках  $Zn_{1-x}Co_xO_y$  вплоть до 24 ат. % Co экспоненциально убывает из-за уменьшения параметров кристаллической решётки, затем возрастает за счёт восстановления стехиометрии плёнок по кислороду вследствие роста его содержания в используемых мишенях. Обнаружено, что удельное сопротивление тонких плёнок  $Zn_{1-x}Co_xO_y$  монотонно возрастает, достигая «насыщения» при  $x = 0,24$ , связанного с пределом растворимости атомов кобальта в основной фазе оксида цинка, а также с тем, что электронные уровни кобальта в запрещённой зоне оксида цинка захватывают свободные носители зарядов.

Установлено, что магнитные свойства тонких плёнок  $Zn_{1-x}Co_xO_y$  при комнатной температуре с увеличением концентрации легирующей примеси изменяются немонотонно.

Уменьшение намагниченности насыщения при увеличении концентрации кобальта в плёнках после 13 ат. % объясняется суммой ферромагнитного и парамагнитного сигналов в образцах (рисунок 4). Ферромагнитный отклик обусловлен кластерами металлического кобальта, в то время как парамагнетизм связан с образованием  $Co_3O_4$  в процессе окисления Co. Увеличение количества парамагнитной фазы  $Co_3O_4$  в тонких плёнках приводит к ослаблению ферромагнитного сигнала. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что высокотемпературный ферромагнетизм в тонких плёнках  $Zn_{1-x}Co_xO_y$ , полученных методом ИЛО, имеет кластерную природу. Определено, что толщина плёнок  $Zn_{1-x}Co_xO_y$  слабо влияет на их электрические и магнитные свойства, а изменение магнитооптических характеристик от толщины плёнок связано с интерференционными эффектами.

**В четвёртой главе** приведены результаты исследования структурных, электрических, магнитных и магнитотранспортных характеристик тонких плёнок  $Zn_{1-x}Mn_xO_y$  ( $x = 0-0,08$ ), синтезированных методом ИЛО при различных условиях, и описаны предполагаемые механизмы появления в них высокотемпературного ферромагнетизма и эффекта колоссального отрицательного магнитосопротивления.

Установлено, что все легированные тонкие плёнки однофазны и сохраняют структуру вюрцита ( $ZnO_{(вюрцит)}$ ), ориентированную вдоль направления (001). Определено, что тонкие плёнки, полученные при одинаковых условиях синтеза, имеют близкие размеры кристаллитов, что подтверждает замещение ионами  $Mn^{2+}$  ионов  $Zn^{2+}$  в полупроводниковой матрице ZnO. Показано, что отжиг образцов в кислородной атмосфере увеличивает шероховатость

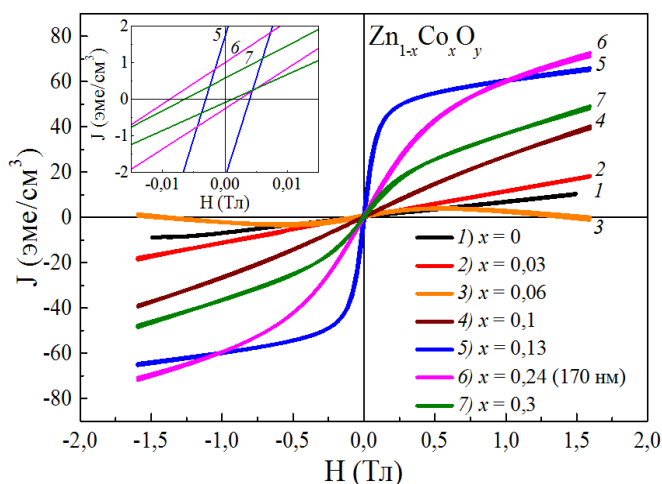


Рисунок 4 – Полевые зависимости намагниченности тонких плёнок  $Zn_{1-x}Co_xO_y$  при  $T = 298$  К; на вставке –  $H_c$  некоторых образцов

поверхности с 1–3 нм до  $\sim 10$  нм, причём, чем выше концентрация марганца в плёнках  $Zn_{1-x}Mn_xO_y$ , тем больше значение  $R_a$ .

Установлено, что все синтезированные плёнки  $Zn_{1-x}Mn_xO_y$  ( $x = 0-0,08$ ) независимо от условий синтеза имеют электронный тип проводимости. Концентрация носителей заряда в них довольно высока ( $n_e \sim 10^{20}-10^{21}$  см $^{-3}$ ), поскольку преобладающими носителями являются кислородные вакансии. Увеличение степени легирования плёнок незначительно изменяет концентрацию электронов, что исключает нахождение марганца в валентных состояниях, отличных от 2+. При увеличении температуры подложек происходит увеличение концентрации кислородных вакансий и, как следствие, проводимости тонких плёнок. Однако отжиг в атмосфере кислорода удаляет кислородные вакансии, в связи с этим проводимость плёнок резко падает. Резкое уменьшение концентрации электронов ( $n_e \sim 10^{12}$  см $^{-3}$ ) в тонких плёнках, подверженных послеростовому отжигу в потоке кислорода при 600 °С, обусловлено их рассеянием на границах зёрен, обогащённых адсорбированным кислородом, который, создавая области объёмного заряда, затрудняет протекание тока.

Определено, что все тонкие плёнки  $Zn_{1-x}Mn_xO_y$  ( $x = 0-0,08$ ) при комнатной температуре демонстрируют ферромагнитное поведение, которое с увеличением в образцах концентрации марганца и кислородных вакансий проявляется сильнее. Несмотря на разную концентрацию кислородных вакансий в тонких плёнках, синтезированных при разных условиях, характер изменения их магнитных характеристик, в частности намагниченности насыщения от концентрации марганца, очень схож (рисунок 5). Предполагается, что в плёнках сосуществуют два механизма, объясняющих высокотемпературный ферромагнетизм: первый – ферромагнитный обмен между катионами марганца посредством кислородных вакансий, второй – суперобменное взаимодействие между кислородными вакансиями. При снижении температуры первый механизм начинает доминировать.

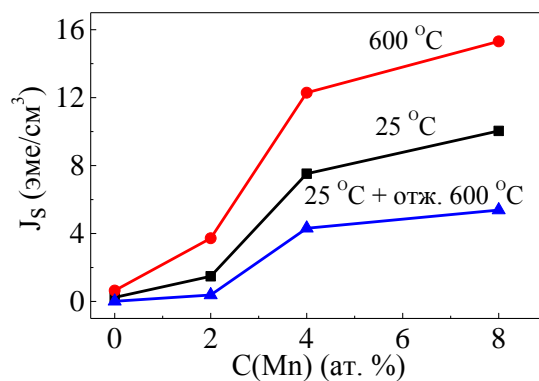


Рисунок 5 – Намагниченность насыщения тонких плёнок  $Zn_{1-x}Mn_xO_y$  при  $T = 298$  К

Обнаружен низкотемпературный ( $50 \text{ K} \geq T \geq 1,4 \text{ K}$ ) эффект колоссального отрицательного магнитосопротивления (ОМС) в тонких плёнках  $Zn_{1-x}Mn_xO_y$  ( $x = 0,02-0,08$ ) с дефицитом кислорода, который усиливается при снижении температуры и при увеличении концентрации марганца (рисунок 6). Можно выделить три режима магнитосопротивления  $Zn_{1-x}Mn_xO_y$ :  $\rho$  возрастает в малых полях, резко убывает в области промежуточных полей и линейно убывает при очень больших полях. Для тонких плёнок  $Zn_{0,98}Mn_{0,02}O_y$  и  $Zn_{0,92}Mn_{0,08}O_y$ , синтезированных при температуре сапфировых подложек 600 °С, значения относительного ОМС при  $T = 1,4$  К и в магнитном поле, перпендикулярном к

плоскости образцов, составляют соответственно 125 % и 225 %. Когда температура снижается, примесные электроны из  $V_O$  начинают замораживаться и создавать канал прыжковой проводимости. Проводимость появляется между  $Mn-V_O$  комплексами, которые ориентированы случайным образом, следовательно, принадлежат разным магнитным поляронам. Магнитное поле, которое стремится выстроить  $Mn-V_O$  комплексы, приводит к резкому спаду удельного сопротивления.

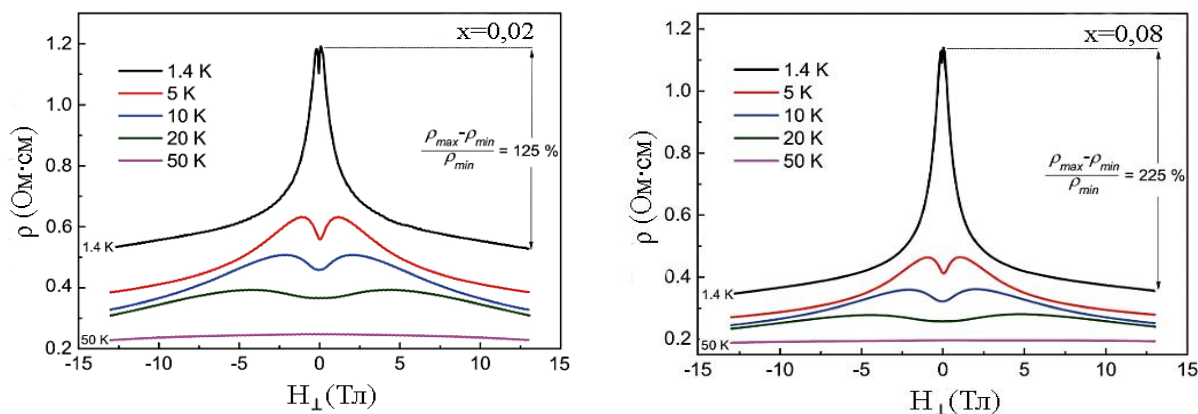


Рисунок 6 – Зависимости магнитосопротивления тонких плёнок  $Zn_{0,98}Mn_{0,02}O_y$  и  $Zn_{0,92}Mn_{0,08}O_y$  при различных температурах

**В пятой главе** приведены результаты исследования структурных, электрических и магнитных свойств тонких плёнок  $Zn_{1-x}Li_xO_y$  ( $x = 0-0,06$ ), синтезированных методом ИЛО, а также результаты изучения элементного состава по толщине образцов и электронного состояния атомов.

Установлено, что все тонкие плёнки  $Zn_{1-x}Li_xO_y$  содержат единственную фазу  $ZnO$  со структурой вюрцита ( $P6_3/mc$ ), ориентированной вдоль направления (001). Разное давление в вакуумной камере в процессе синтеза образцов влияет на количество кислородных вакансий в них, но не на фазовый состав и распределение элементов по толщине плёнок. Кратковременный отжиг образцов в потоке аргона при температуре 700 и 900 °C приводит к увеличению размера зёрен до 370 нм и шероховатости поверхности до 20 нм.

Обнаружено, что исследуемые  $ZnO$  плёнки, легированные акцепторной примесью (Li) и не подверженные отжигу в потоке кислорода, имеют электронную проводимость, обусловленную эффектом самокомпенсации. Росту концентрации электронов способствует более высокое давление в процессе роста (большая нестехиометрия плёнок по кислороду).

Разработана методика получения дырочной проводимости ( $n_h \sim 10^{16}-10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) в тонких плёнках  $Zn_{1-x}Li_xO_y$  ( $x = 0-0,06$ ), заключающаяся в их кратковременном отжиге в потоке аргона при  $t = 700; 900 \text{ °C}$  и в потоке кислорода при  $t = 300 \text{ °C}$  с промежуточной закалкой в деионизированной воде после 5-ой, 10-ой, 20-ой, 40-ой и 60-ой мин. Наибольшая концентрация дырок ( $n_h$ ) для этих плёнок достигалась спустя 10 мин отжига в потоке кислорода. Максимальное значение  $n_h$ , равное  $1,91 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , зафиксировано для образца  $Zn_{0,98}Li_{0,02}O_y(11)$ , отожжённого в потоке аргона при 700 °C и в потоке кислорода при 300 °C (рисунок 7 а). После 10 мин концентрация носителей заряда образцов уменьшалась по закону

близкому к экспоненциальному ( $n = n_0 + ae^{\tau}$ ), достигая значений  $n_h \sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$  (вставка на рисунке 7 а). Повторные измерения концентрации носителей заряда для тонких плёнок, которые были подвержены термообработке в потоке кислорода, проводились несколько раз в течение трёх недель (рисунок 7 б). Установлено, что для всех плёнок, в которых ранее был достигнут  $p$ -тип проводимости, концентрация дырок в пределах погрешности оставалась стабильной во времени. Предполагается, что концентрация кислородных вакансий, входящих в комплексы  $V_O-Li_i$  (акцепторные центры), является важным фактором, определяющим проводимость  $p$ -типа.

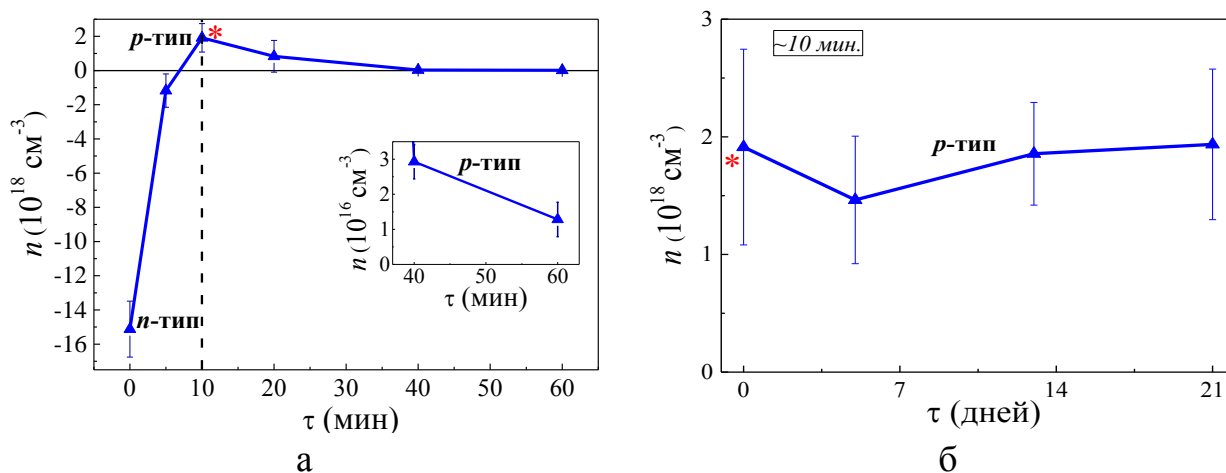


Рисунок 7 – а) Зависимость концентрации носителей заряда плёнки  $Zn_{0,98}Li_{0,02}O_y(11)$ , предварительно отожжённой в аргоне при  $700 \text{ }^\circ\text{C}$ , от времени отжига в потоке кислорода (на вставке –  $n(\tau)$  при  $\tau = 40\text{--}60$  мин); б) Результаты повторных измерений концентрации носителей заряда в плёнке  $Zn_{0,98}Li_{0,02}O_y(11)$  после отжига в потоке кислорода в течение 10 мин

Обнаружен слабый высокотемпературный ферромагнетизм  $Zn_{1-x}Li_xO_y$  ( $x = 0,02\text{--}0,06$ ), синтезированных при давлении  $3,15 \cdot 10^{-5}$  Торр (рисунок 8). Магнитные характеристики образцов  $Zn_{0,98}Li_{0,02}O_y(10)$  и  $Zn_{0,96}Li_{0,04}O_y(10)$  очень близки. Для этих тонких плёнок магнитные моменты насыщения соответственно равны  $4,3 \cdot 10^{-6}$  и  $4,8 \cdot 10^{-6}$  эме, а коэрцитивная сила – 28 и 40 Э. Наиболее явно выраженный высокотемпературный ферромагнетизм наблюдается для образца  $Zn_{0,94}Li_{0,06}O_y(10)$ . Для него характерна более широкая петля гистерезиса с коэрцитивной силой 72 Э и наибольший среди исследуемых образцов магнитный момент насыщения, равный  $7 \cdot 10^{-6}$  эме. Увеличение концентрации лития с 2 до 6 ат. % позволяет увеличить коэрцитивную силу в плёнках  $Zn_{1-x}Li_xO_y$  почти пропорционально ( $\sim$  в 3,2 раза).

Для понимания химической связи атомов лития были рассмотрены фотоэлектронные спектры лития для образца  $Zn_{0,98}Li_{0,02}O_y(10)$  (рисунок 9). В результате измерений обнаружен пик лития в состоянии  $Li_i$ , максимум которого находится при 52,7 эВ. Лёгкая асимметричность пика в область больших энергий может указывать на существование небольшого количества  $Li_{Zn}$  атомов. Следовательно, большинство атомов лития не внедряются в кристаллическую решётку, а занимают междоузлия, при этом не искажая её.

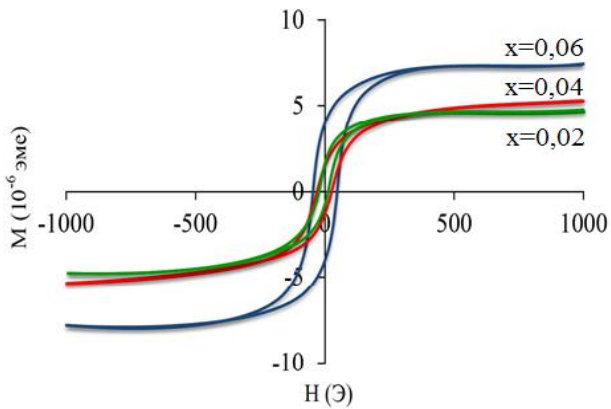


Рисунок 8 – Полевые зависимости магнитного момента тонких плёнок  $Zn_{0,98}Li_{0,02}O_y(10)$ ,  $Zn_{0,96}Li_{0,04}O_y(10)$  и  $Zn_{0,94}Li_{0,06}O_y(10)$  при  $T = 298$  К

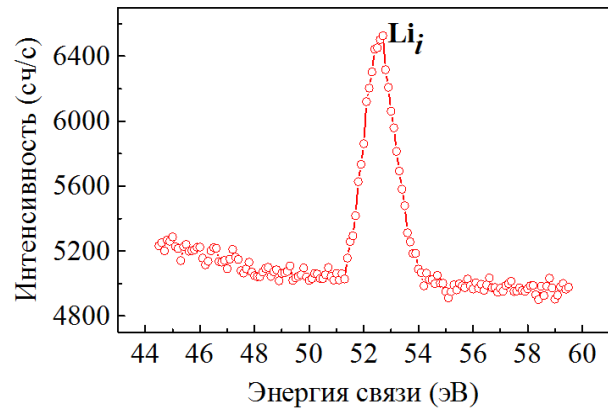


Рисунок 9 – Фотоэлектронный спектр лития в плёнке  $Zn_{0,98}Li_{0,02}O_y(10)$ , синтезированной при давлении  $3,15 \cdot 10^{-5}$  Торр

Таким образом, установлено, что при увеличении концентрации лития в тонких плёнках  $Zn_{1-x}Li_xO_y$  усиление ферромагнитного сигнала при комнатной температуре связано с ростом количества дефектов внедрения ( $Li_i$ ) в образцах.

**В заключении** приведены **основные результаты и выводы** диссертационной работы:

1. Методом ИЛО получены тонкие плёнки  $Zn_{1-x}Co_xO_y$  ( $x = 0-0,42$ ),  $Zn_{1-x}Mn_xO_y$  ( $x = 0-0,08$ ) и  $Zn_{1-x}Li_xO_y$  ( $x = 0-0,06$ ) различной толщины, обладающие низкой шероховатостью поверхностей (1–7 нм). Установлено, что кратковременный отжиг образцов в потоке аргона или кислорода приводит к увеличению шероховатости поверхности до 10–20 нм. Определено, что все синтезированные плёнки содержат в качестве основной фазы ZnO со структурой вюрцита ( $P6_3/mc$ ), ориентированной вдоль оси  $c$ . При увеличении степени легирования в плёнках  $Zn_{1-x}Mn_xO_y$  и  $Zn_{1-x}Li_xO_y$  образования вторичных фаз не происходит, в то время как для  $Zn_{1-x}Co_xO_y$  наблюдается появление новой фазы – металлического кобальта гексагональной структуры, окисление которого приводит к формированию парамагнитной фазы  $Co_3O_4$  кубической структуры.

2. Определено, что во всем диапазоне  $x$  все тонкие плёнки  $Zn_{1-x}Co_xO_y$  ( $x = 0-0,42$ ),  $Zn_{1-x}Mn_xO_y$  ( $x = 0-0,08$ ) и  $Zn_{1-x}Li_xO_y$  ( $x = 0-0,06$ ), кроме отожжённых в потоке кислорода, обладают проводимостью  $n$ -типа и достаточно высокой концентрацией носителей заряда ( $n_e \sim 10^{19}-10^{21}$  см<sup>-3</sup>), обусловленной ростом плёнок в условиях высокого вакуума (нестехиометрией плёнок по кислороду).

3. Обнаружено, что с ростом  $x$  в  $Zn_{1-x}Co_xO_y$  концентрация электронов убывает экспоненциально, что связано с глубоким залеганием энергетических уровней Co в запрещённой зоне ZnO, являющихся не эффективными поставщиками носителей в разрешённые зоны. Определено, что подвижность носителей заряда в тонких плёнках  $Zn_{1-x}Co_xO_y$  вплоть до 24 ат. % Co экспоненциально убывает из-за уменьшения параметров кристаллической решётки, затем возрастает за счёт восстановления стехиометрии плёнок по кислороду вследствие роста его содержания в используемых керамических

мишенях. Показано, что удельное сопротивление тонких плёнок  $Zn_{1-x}Co_xO_y$  монотонно возрастает, достигая «насыщения» при  $x = 0,24$ , что связано с пределом растворимости атомов кобальта в основной фазе оксида цинка, а также с тем, что электронные уровни кобальта в запрещённой зоне оксида цинка захватывают свободные носители зарядов.

4. Определено, что концентрация носителей зарядов в  $Zn_{1-x}Mn_xO_y$  ( $x = 0-0,08$ ) довольно высока ( $n_e \sim 10^{20}-10^{21} \text{ см}^{-3}$ ). Это означает, что преобладающими носителями в них являются кислородные вакансии. Увеличение степени легирования плёнок незначительно изменяет концентрацию электронов, что исключает нахождение марганца в валентных состояниях, отличных от  $2+$ . При увеличении температуры подложек происходит увеличение концентрации кислородных вакансий и, как следствие, увеличение проводимости тонких плёнок. Однако отжиг в атмосфере кислорода удаляет кислородные вакансии, в связи с этим проводимость плёнок резко падает.

5. Разработана методика получения стабильной во времени дырочной проводимости ( $n_h \sim 10^{16}-10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) в тонких плёнках  $Zn_{1-x}Li_xO_y$  ( $x = 0-0,06$ ), заключающаяся сначала в их кратковременном ( $\tau = 10$  мин) послеростовом отжиге в потоке аргона, затем в потоке кислорода с промежуточной закалкой в деионизированной воде. Наибольшая концентрация дырок ( $n_h = 1,91 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) достигнута в плёнке ZnO, легированной 2 ат. % Li.

6. Обнаружен слабый высокотемпературный ферромагнетизм в тонких плёнках  $Zn_{1-x}Co_xO_y$  ( $x = 0,13-0,42$ ),  $Zn_{1-x}Mn_xO_y$  ( $x = 0-0,08$ ),  $Zn_{1-x}Li_xO_y$  ( $x = 0,02-0,06$ ). Показано, что при комнатной температуре с ростом концентрации легирующей примеси в тонких плёнках  $Zn_{1-x}Mn_xO_y$  и  $Zn_{1-x}Li_xO_y$  наблюдаются усиление ферромагнитного сигнала, в то время как магнитные свойства в  $Zn_{1-x}Co_xO_y$  изменяются немонотонно. Установлено, что природа высокотемпературного ферромагнетизма в тонких плёнках  $Zn_{1-x}Co_xO_y$ ,  $Zn_{1-x}Mn_xO_y$  и  $Zn_{1-x}Li_xO_y$  различна. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что высокотемпературный ферромагнетизм в тонких плёнках  $Zn_{1-x}Co_xO_y$  имеет кластерную природу, а в  $Zn_{1-x}Li_xO_y$  он связан с ростом количества дефектов внедрения ( $Li_i$ ). Предполагается, что в плёнках  $Zn_{1-x}Mn_xO_y$  ( $x = 0-0,08$ ) сосуществуют два механизма, обуславливающие высокотемпературный ферромагнетизм: первый – ферромагнитный обмен между катионами марганца посредством кислородных вакансий, второй – суперобменное взаимодействие между кислородными вакансиями.

7. Обнаружен низкотемпературный эффект колоссального отрицательного магнитосопротивления в тонких плёнках  $Zn_{1-x}Mn_xO_y$  ( $x = 0,02-0,08$ ) с дефицитом кислорода, который усиливается при снижении температуры и при увеличении концентрации марганца. Этот аномальный эффект обусловлен тем, что внешнее магнитное поле стремится выстроить Mn– $V_O$  комплексы, которые ориентированы случайным образом (принадлежат разным магнитным поляронам), и поэтому приводит к резкому снижению удельного сопротивления плёнок.

8. Установлено, что атомная концентрация кобальта в центре мишеней  $\text{ZnO-Co}_3\text{O}_4$ , полученных твердофазным синтезом, в несколько раз превышает его концентрацию на краю мишеней, что объяснено в рамках тепловой модели воздействия лазерного излучения с полупроводником. Обнаружено, что при воздействии излучения эксимерного  $\text{KrF}$ -лазера на поверхности керамических мишеней по механизму «пар–жидкость–кристалл» формируются конусообразные структуры и микровиссеры, ориентированные к центру мишеней (обобщённая модель роста нитевидных структур). Уменьшение радиуса кристаллов от времени происходит в связи с уменьшением объёма капли катализатора в ходе её испарения при сохранении состава насыщенного раствора жидкости. Определено, что количество структур на поверхности модифицированных мишеней пропорционально зависит от концентрации кобальта в мишенях.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Публикации в журналах, рекомендованных ВАК РФ*

1. Magnetism and magneto-optics features of  $\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_y$  thin films grown by pulsed laser deposition / A.S. Kuz'mina, A.A. Lotin, O.A. Novodvorsky, N.S. Perov, E.A. Gan'shina, L.A. Makarova, A.S. Semisalova, A.G. Shneider, M.P. Kuz'min, S.S. Kolesnikov // Materials chemistry and physics. – 2017. – Vol. 198. – P. 291–296.
2. Giant negative magnetoresistance in manganese-substituted zinc oxide / X.L. Wang, Q. Shao, A.S. Zhuravlyova (Kuz'mina), M. He, Y. Yi, R. Lortz, J.N. Wang, A. Ruotolo // Scientific reports. – 2015. – Vol. 5, № 9221. – P. 1–5.
3. Журавлёва (Кузьмина) А.С. Корреляция транспортных и магнитных характеристик в тонких плёнках  $\text{ZnO}$ , легированных  $\text{Li}$  / А.С. Журавлёва (Кузьмина) // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – № 11 (106). – С. 118–123.
4. Журавлёва (Кузьмина) А.С. Структурные особенности тонких плёнок  $\text{Li}_{0.06}\text{Zn}_{0.94}\text{O}$ , полученных методом импульсного лазерного напыления / А.С. Журавлёва (Кузьмина) // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2014. – № 9 (92). – С. 24–29.

### *Другие публикации и тезисы докладов конференций*

5. Высокотемпературные тонкие плёнки  $\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_y$  / А.А. Лотин, А.С. Журавлёва (Кузьмина), О.А. Новодворский, В.А. Михалевский, Л.С. Паршина, О.Д. Храмова, Е.А. Черобыло, Н.С. Перов, Л.А. Макарова // От конвергенции наук к природоподобным технологиям: сборник тезисов I рос. кристаллографич. конгресса, нояб. 2016 г. – Москва, 2016. – С. 90.
6. Влияние условий электрохимического оксидирования на морфологию и устойчивость анодных плёнок  $\text{ZnO}$  / А.С. Журавлёва (Кузьмина), О.Д. Петрова, М.П. Кузьмин, М.Ю. Кузьмина // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2016. – № 1 (108). – С. 107–115.

7. Роль кислородных вакансий в высокотемпературном ферромагнетизме плёнок  $Zn_{1-x}Co_xO_y$  / А.А. Лотин, А.С. Журавлёва (Кузьмина), О.А. Новодворский, В.А. Михалевский, Л.С. Паршина, О.Д. Храмова, Е.А. Черобыло, Н.С. Перов, Л.А. Макарова, А.Г. Шнейдер, М.П. Кузьмин // Актуальные проблемы физики твёрдого тела (ФТТ–2016): сборник докладов VII межд. науч. конф.; Т.1, нояб. 2016 г. – Минск, 2016. – С. 124–126.

8. Высокотемпературный ферромагнетизм тонких плёнок  $Zn_{1-x}Co_xO_y$ , полученных методом импульсного лазерного осаждения / О.А. Новодворский, А.А. Лотин, А.С. Журавлёва (Кузьмина), Н.С. Перов, Л.А. Макарова, А.Г. Шнейдер, М.П. Кузьмин // Магнитные материалы. Новые технологии: материалы VII байкал. межд. конф., авг. 2016 г. – Листвянка, 2016. – С. 181–182.

9. Кузьмина А.С. РМП на основе оксида цинка – перспективные материалы полупроводниковой спинтроники / А.С. Кузьмина // Актуальные проблемы современной науки: сборник тезисов науч. работ XIV межд. науч.-практ. конф., нояб. 2016 г. – СПб, 2016. – С. 31–34.

10. Механизм формирования пассивных плёнок на цинке / А.С. Журавлёва (Кузьмина), О.Д. Петрова, М.Ю. Кузьмина, М.П. Кузьмин // Переработка природного сырья: сборник науч. трудов студ., магистр., аспирант. и мол. уч. ИМиХТ им. С.Б. Леонова, дек. 2015 г. – Иркутск, 2015. – С. 21–23.

11. Журавлёва (Кузьмина) А.С. Свойства и применение металлического цинка и его оксида / А.С. Журавлёва (Кузьмина), О.Д. Петрова, М.Ю. Кузьмина // Перспективы развития технологии переработки углеводородных, растительных и минеральных ресурсов: материалы докл. V всеросс. науч.-практ. конф. с межд. участ., апр. 2015 г. – Иркутск, 2015. – С. 42–44.

12. Журавлёва (Кузьмина) А.С. Эффект аномального гигантского магнитосопротивления в тонких плёнках  $Mn:ZnO$  / А.С. Журавлёва (Кузьмина), М.П. Кузьмин // Инновации в материаловедении: сборник материалов II всеросс. молод. науч.-технич. конф. с межд. участ., июнь 2015 г. – Москва, 2015. – С. 189–191.

13. Журавлёва (Кузьмина) А.С. Исследование магнитных и электрических характеристик наноструктурных плёнок  $ZnO:(Li,Mn)$ , полученных методом импульсного лазерного напыления / А.С. Журавлёва (Кузьмина) // Физико–химия и технология неорганических материалов: материалы докл. X всеросс. науч.-практ. конф. мол. науч. сотр. и асп., окт. 2013 г. – Москва, 2013. – С. 387–390.

14. Журавлёва (Кузьмина) А.С. Синтез и исследование свойств тонких плёнок оксида цинка, легированных марганцем и литием / А.С. Журавлёва (Кузьмина) // Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение: материалы докл. XII межд. науч.-практ. конф., окт. 2013 г. – Саранск, 2013. – С. 117.

15. Журавлёва (Кузьмина) А.С. Особенности магнитных свойств разбавленных магнитных полупроводниковых плёнок  $Li_xZn_{1-x}O$ ,  $Mn_xZn_{1-x}O$  / А.С. Журавлёва (Кузьмина) // Проблемы физики конденсированного состояния вещества: материалы докл. XIV всеросс. науч.-практ. школы-сем., нояб. 2013 г. – Екатеринбург, 2013. – С. 49.

Подписано в печать \_\_. \_\_. \_\_\_\_\_. Формат 60×90 / 16.  
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 1,125.  
Тираж 100 экз. Зак. \_\_\_\_\_. Поз. плана 9н.

Отпечатано в издательстве  
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный  
исследовательский технический университет»  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83