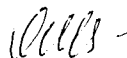


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В.ЛОМОНОСОВА»

---

**ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

На правах рукописи



Максимова Ольга Владимировна

**Влияние легирования и условий осаждения на локализацию и перенос  
электронов в тонких плёнках оксида цинка и оксида индия**

Специальность 01.04.09 - физика низких температур

Автореферат

30 СЕН 2015

диссертация на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

---

Москва 2015



005562592

Работа выполнена на кафедре низких температур и сверхпроводимости физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова».

**Научный руководитель:**

**Кьтин Владимир Геннадиевич**, кандидат физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», физический факультет, кафедра низких температур и сверхпроводимости.

**Официальные оппоненты:**

**Попов Михаил Юрьевич**, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией функциональных материалов, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Технологический институт сверхтвёрдых и новых углеродных материалов"

**Васильевский Иван Сергеевич**, кандидат физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Национальный ядерный университет "МИФИ", кафедра № 67 "Физика конденсированных сред"

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт биохимической физики им. Н.М. Эммануэля" Российской академии наук (ИБХФ РАН)

Защита состоится «15» октября 2015 года в 16.00 на заседании Диссертационного совета Д. 501.001.70 при Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, по адресу: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, стр. 35, конференц-зал Центра коллективного пользования.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова и в сети Internet по эл.адресу: <http://phys.msu.ru/rus/research/disser/sovets-...../>  
Автореферат разослан «//» сентября 2015 года.

Ученый секретарь Диссертационного совета Д. 501.001.70

кандидат физ.-мат. наук, доцент



А.И. Ефимова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Оксиды цинка и индия, являясь широкозонными полупроводниками, обладают необычным сочетанием свойств — прозрачностью в видимом диапазоне электромагнитного излучения и высокой электропроводностью. Несмотря на большое внимание со стороны научного сообщества к исследованию оксидов металлов, природа многих экспериментально наблюдаемых особенностей электрофизических и гальваномагнитных свойств остается до конца неясной.

Это утверждение в особенности справедливо по отношению к тонким плёнкам, в которых помимо дефектов существенную роль может играть размерность системы электронов по отношению к тем или иным явлениям. Например, в некоторых работах сообщалось о наблюдении при низких температурах отрицательного магнетосопротивления в легированных донорной примесью плёнках оксида цинка, что интерпретировалось в рамках явления слабой локализации. При этом типичная толщина исследуемых пленок оксида цинка и индия такова, что под действием магнитного поля и изменения температуры должно происходить изменение размерности системы электронов по отношению к явлению слабой локализации. Исследование такого изменения размерности отсутствует в доступной литературе. В то же время его изучение важно, как для описания наблюдаемых гальваномагнитных свойств, так и для определения времени релаксации фазы волновой функции, которое является важнейшим параметром в теории Ферми-жидкости.

Известно, что электропроводность плёнок оксидов цинка и индия существенно зависит от условий их синтеза. При этом значения электропроводности, представленные в литературе, изменяются от типичных для вырожденных полупроводников с зонным механизмом проводимости до очень малых, характерных для изоляторов с активационной или прыжковой проводимостью. Это указывает на то, что при определённом уровне дефектности в плёнках оксида цинка может происходить локализация подвижных носителей заряда. Вместе с тем механизмы этой локализации и параметры локализованных электронных состояний остаются малонизученными, в то время как их понимание важно для получения плёнок с более высокой подвижностью электронов и высокой прозрачностью.

Модификация электрофизических свойств проводящих пленок достигается не только изменением условий синтеза, но и легированием. Так, для увеличения концентрации электронов оксид цинка легируют элементами III группы. Недавно были опубликованы данные, показывающие, что в плёнках ZnO:Ga концентрация электронов может превышать  $10^{21}$  см<sup>-3</sup>. Это

максимальное значение концентрации электронов в оксиде цинка достигнутое к настоящему времени.

Значительное количество современных работ посвящено изучению проводящих оксидов металлов, легированных магнитными примесями. В частности, активно исследуются плёнки оксида цинка, легированные марганцем и кобальтом. Магнитная примесь заметно влияет на проводящие свойства плёнок особенно при низких температурах. Наиболее ярким проявлением этого влияния является наблюдение необычного магнетосопротивления при низких температурах. Величина наблюдаемого магнетосопротивления достигает сотен процентов. *Общепринятая интерпретация данного эффекта в настоящее время отсутствует. В тоже время объяснение наблюдаемого магнеторезистивного эффекта важно для выяснения механизмов влияния магнитной примеси на перенос электронов и получения тонких плёнок с необычными гальвано-магнитными свойствами.*

Из вышесказанного ясно, что тема диссертационной работы чрезвычайно актуальна.

**Целью работы** являлось изучение влияния условий осаждения и легирования галлием и кобальтом на механизмы переноса и локализацию электронов в тонких плёнках оксидов цинка и индия.

**Задачи работы:**

1. Анализ механизмов низкотемпературной электропроводности в плёнках оксида цинка, легированного галлием, синтезированных методом химического осаждения из газовой фазы;
2. Изучение влияния примеси кобальта на электропроводность и гальвано-магнитные свойства плёнок оксида цинка при низких температурах до 4,2К;
3. Определение механизмов проводимости и исследование влияния условий синтеза на проводящие свойства пленок оксида индия, легированного оловом, полученных методом магнетронного распыления.
4. Расчет в рамках диффузионного приближения магнетосопротивления, обусловленного явлением слабой локализации, в пленках произвольной толщины.

**Научная новизна**

Проанализировано влияние легирования галлием на электропроводность, концентрацию и подвижность электронов в эпитаксиальных плёнках оксида цинка, синтезированных методом химического осаждения из газовой фазы в окислительных условиях.

В плёнках оксида цинка, легированного галлием, синтезированных в условиях пиролизного гидролиза, исследована температурная зависимость сопротивления и магнетосопротивления. Из анализа температурной зависимости сопротивления и магнетосопротивления получены значения радиуса локализации электронных состояний и плотности электронных состояний на уровне Ферми.

При низких температурах исследовано отрицательное магнетосопротивление в плёнках оксида цинка, легированного галлием, и в пленках оксида индия, легированного оловом. Получены температурные зависимости времени релаксации фазы волновой функции электронов. Проведено сравнение полученных зависимостей с теоретическими зависимостями для электрон-электронного и электрон-фононного механизма релаксации фазы.

Проведен анализ положительного магнетосопротивления плёнок оксида цинка, легированного кобальтом, в рамках модели, учитывающей обменное взаимодействие электронов, участвующих в проводимости, с  $d$  - электронами кобальта, а также случайное распределение атомов кобальта. Получено значение радиуса локализации электронных состояний, близкое к радиусу мелких доноров в ZnO.

В рамках диффузионного приближения получено выражение, описывающее магнетосопротивление тонких плёнок вырожденных полупроводников, обусловленное явлением слабой локализации, действительное при изменении размерности плёнок по отношению к явлению слабой локализации под действием магнитного поля и температуры.

#### Положения, выносимые на защиту:

При легировании галлием электропроводность плёнок ZnO:Ga, осаждённых из газовой фазы в окислительных условиях, и подвижность электронов в них достигает максимального значения при содержании галлия близком к 7 ат.%. При таком содержании галлия преобладает зонный механизм электропроводности, а статистика электронов вырождена при температурах до 295 К.

В поликристаллических плёнках ZnO:Ga, осаждённых в условиях пиролиза в диапазоне температур 4,2-295К наблюдается прыжковая проводимость с переменной длиной прыжка. При увеличении содержания галлия плотность локализованных электронных состояний на уровне Ферми увеличивается, а радиус локализации состояний изменяется слабо.

Отрицательное магнетосопротивление в исследованных плёнках оксида цинка, легированного галлием, синтезированных в окислительных условиях, и пленках оксида индия, легированного оловом, синтезированных из оксидных мишеней, может быть описано полученным в работе выражением для магнетосопротивления, обусловленного слабой локализацией, действительным при изменении размерности пленки по отношению к явлению слабой локализации под действием магнитного поля.

Температурные зависимости времени релаксации фазы волновой функции электронов, полученные при аппроксимации отрицательного магнетосопротивления плёнок оксида цинка, легированного галлием, и оксида индия, легированного оловом, описываются степенными функциями с показателем степени, соответствующим электрон-электронному механизму релаксации фазы. При этом экспериментальные значения времени релаксации фазы волновой

функции в несколько раз меньше теоретических для электрон-электронного и электрон-фононного механизмов релаксации.

Положительное магнетосопротивление в плёнках оксида цинка, легированного кобальтом, с прыжковым механизмом проводимости может быть, в ограниченном интервале магнитных полей, объяснено уменьшением плотности электронных состояний на уровне Ферми в магнитном поле вследствие обменного взаимодействия между электронами проводимости и случайно расположенными атомами кобальта. Полученное из анализа магнетосопротивления значение радиуса локализации электронных состояний близко к радиусу мелких доноров в ZnO.

#### **Научная и практическая значимость работы**

Научная ценность работы заключается в том, что представленные в работе данные получены при исследовании пленок легированных оксидов цинка и индия, являющихся широкозонными полупроводниками и обладающими необычным сочетанием свойств — прозрачностью в видимом диапазоне электромагнитного излучения и высокой подвижностью электронов. При исследованиях определялись зависимости электрофизических и гальваномагнитных свойств пленок оксида цинка, легированного галлием и кобальтом, и пленок оксида индия, легированного оловом, от содержания легирующей примеси в широком диапазоне температур от 4,2 до 295K и магнитных полей до 6 Тл, при этом учитывались методы и параметры синтеза исследуемых пленок.

Так, в результате выполнения работы установлено, что при легировании галлием концентрация и подвижность электронов в плёнках ZnO:Ga, осаждённых из газовой фазы в окислительных условиях, достигает максимального значения при содержании галлия близком к 7 ат.%. При таком содержании галлия преобладает зонный механизм электропроводности. Установлено, что в поликристаллических плёнках ZnO:Ga, осаждённых в условиях пиролиза, наблюдается прыжковая проводимость с переменной длиной прыжка. Обнаружено, что в плёнках оксида цинка, легированного кобальтом, при низких температурах наблюдается аномальное положительное магнетосопротивление, величина которого увеличивается при увеличении содержания Co. Получено выражение для квантовой поправки к проводимости, обусловленной слабой локализацией, действительное для плёнок произвольной толщины при изменении магнитного поля и температуры. Полученные в работе результаты могут иметь практическое применение при решении задач по повышению электропроводности плёнок оксида цинка, легированного галлием, кобальтом и оксида индия, легированного оловом.

#### **Обоснованность и достоверность результатов**

Основные результаты и выводы диссертации получены в результате анализа экспериментальных данных. Экспериментальные данные получены на достаточном количестве исследованных образцов. Достоверность полученных экспериментальных данных

подтверждается их воспроизводимостью и использованием надежных и проверенных методик. Анализ экспериментальных данных проводился на основе большого количества литературных данных с использованием современных моделей и теоретических подходов. Всё перечисленное подтверждает достоверность полученных результатов и выводов диссертации

#### Апробация результатов работы

Результаты, полученные в настоящей работе, докладывались на:

1. 35-м Собрании по физике низких температур, Черноголовка, 2009.
2. 7 Курчатовская молодежная научная школа, РИЦ "Курчатовский институт", 2009;
3. Международной конференции «International Conference of functional materials», Partenit, 2009.
4. 36-м Собрании по физике низких температур, Санкт-Петербург, 2012.
5. XIX Международной зимней школе по физике полупроводников, Екатеринбург, 2012.
6. XX Международной зимней школе по физике полупроводников, Екатеринбург, 2014.
7. Международном симпозиуме «Moscow International Symposium on Magnetism», Moscow, 2014.
8. Международной конференции «27th International Conference on Low Temperature Physics, Buenos-Aires», 2014.
9. Международной конференции «5th International Symposium on Transparent Conductive Materials», Platania, 2014.
10. Российской конференции по физике и астрономии Санкт-Петербург, 2014.

#### Публикации

По теме диссертации опубликована 21 работа, в том числе 5 статей, 14 тезисов и 2 трудов докладов конференций.

#### Личный вклад автора в диссертационную работу

Автором внесены основной творческий вклад в диссертацию. Экспериментальные данные по исследованию электрофизических и гальвано-магнитных свойств плёнок оксида цинка, легированного кобальтом и галием, и плёнок оксида индия, легированного оловом, представленные в диссертации, получены автором лично. Анализ и систематизация экспериментальных данных проведены непосредственно автором диссертации.

#### Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, включает список цитированной литературы из 140 ссылок. Объем диссертации составляет 132 страницы, включая 116 рисунков и 8 таблиц.

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность темы и выбор объекта исследований, указаны цели и задачи исследований, показана новизна и апробация работы.

**В главе 1** представлен обзор литературных данных о кристаллической, зонной структуре,

электрофизических и гальваномагнитных свойствах оксидов индия и цинка.

В начале главы 1 представлены современные данные о кристаллической и электронной структуре оксидов цинка и индия. В настоящее время известно, что оксид цинка кристаллизуется в трёх модификациях, из которых наиболее распространённой является структура вюрцита. Согласно имеющимся экспериментальным данным и теоретическим расчётам из первых принципов, оксид цинка является широкозонным полупроводником с шириной запрещённой зоны 3,4 эВ. Минимум зоны проводимости и максимум валентной зоны расположены в центре зоны Бриллюэна, эффективная масса электронов в оксиде цинка составляет 0,28  $m_e$ . Оксид индия имеет кристаллическую структуру типа биксбита, первой зоной Бриллюэна для  $\text{In}_2\text{O}_3$  является фигура, похожая на кубоктаэдр. Результаты теоретических расчетов и исследование спектров оптического поглощения кристаллов  $\text{In}_2\text{O}_3$ , представленные в работе, указывают на то, что  $\text{In}_2\text{O}_3$  имеет прямую запрещенную зону, ширина фундаментальной запрещенной зоны составляет 2,9 эВ. Эффективная масса электронов в  $\text{In}_2\text{O}_3$  составляет 0,35  $m_e^*$ .

Также в главе 1 представлены данные о влиянии легирования на проводящие свойства оксида индия и цинка. Отмечено, что легирование донорной примесью может значительно увеличить концентрацию электронов проводимости в плёнках оксида цинка и оксида индия. Легирование пленок оксида цинка магнитной примесью может значительно модифицировать электрофизические и другие свойства пленок.

Далее в главе 1 приведены литературные данные об исследовании подвижности электронов в пленках оксида цинка и оксида индия, рассмотрены основные механизмы рассеяния электронов. Показано, что в пленках оксида цинка значительную роль играет рассеяние на полярных оптических фононах, ионах примеси и границах кристаллитов. В плёнках  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$  рассеяние на границах зерен и акустических фононах, предположительно, играет второстепенную роль, при этом сильное влияние на проводимость оказывает рассеяние электронов проводимости на нейтральной и ионизированной примеси.

Далее представлен обзор литературных данных об исследовании электрофизических свойств пленок оксида цинка и оксида индия с прыжковым механизмом переноса носителей заряда, приведены основные модели, применяемые для анализа магнетосопротивления плёнок  $\text{ZnO}$  и  $\text{In}_2\text{O}_3$  с прыжковым механизмом переноса электронов. Согласно литературным данным, условия синтеза и тип легирующей примеси значительно влияют на механизмы проводимости и магнетосопротивление в пленках оксида индия и оксиде цинка. В пленках оксида цинка, легированных ионами магнитной примеси кобальта или марганца, наблюдался прыжковый перенос носителей заряда и аномальное положительное магнетосопротивление. Механизм формирования аномального положительного магнетосопротивления является дискуссионным. В пленках оксида индия с прыжковым механизмом переноса наблюдалось отрицательное



магнетосопротивление (ОМС), которое в литературе интерпретировалось в рамках модели, учитывающей интерференцию электронов при туннелировании.

Кроме того в главе 1 представлены литературные данные об исследовании температурной зависимости сопротивления и магнетосопротивления в пленках оксида цинка и оксида индия с вырожденной статистикой электронов. Согласно представленным в литературе данным при низких температурах в пленках оксида индия и цинка наблюдались температурные зависимости сопротивления и магнетосопротивления, которые характерны для явления слабой локализации. Анализ ОМС в данных пленках проводился на основе теории квантовых поправок к проводимости, при этом наблюдаемое в пленках отрицательное магнетосопротивление не всегда описывалось известными выражениями для квантовых поправок к проводимости для двумерных или трехмерных систем, что может быть связано с изменением размерности пленок по отношению к явлению слабой локализации под действием магнитного поля. В главе 1 также изложены основные положения теории квантовых поправок к проводимости и представлены выражения для квантовых поправок к проводимости в магнитном поле для систем различной размерности.

Исследование явления слабой локализации позволяет извлечь информацию о времени релаксации фазы волновой функции, которое является фундаментальным параметром в теории Ферми-жидкости. В заключительном разделе Главы 1 рассмотрены основные механизмы релаксации фазы волновой функции и представлены результаты теоретических работ, предсказывающих температурную зависимость обратного времени релаксации фазы волновой функции для различных механизмов неупругой релаксации. В этом же разделе представлены литературные данные об исследовании температурной зависимости обратного времени релаксации фазы волновой функции, полученного при аппроксимации отрицательного магнетосопротивления выражениями для квантовых поправок к проводимости, в пленках оксида цинка и оксида индия. Согласно литературным данным в пленках оксида индия и цинка наблюдается температурная зависимость обратного времени релаксации, характерная для электрон-электронного механизма релаксации фазы волновой функции. Однако значения обратного времени релаксации фазы волновой функции существенно отличаются от предсказываемых теорией.

**В главе 2** описана методика синтеза, состав, структура и морфология поверхности исследованных плёнок, приведены результаты исследования магнитных свойств пленок  $ZnO:Co$ . Кроме того описана методика исследования электрофизических и гальвано-магнитных свойств пленок и проведен анализ погрешности измерений.

Синтез и исследование структуры, состава и морфологии поверхности пленок оксида цинка были проведены на Химическом факультете МГУ к.х.н. Буровой Л.И. в лаборатории

Кауля А.Р. Осаждение пленок оксида индия, легированного оловом, а также анализ структуры и состава плёнок были проведены в Центре материаловедения в лаборатории проф. Т.Йоханссона, Осло, Норвегия. Пленки оксида цинка были изготовлены методом химического осаждения из газовой фазы на подложки из оксида циркония и сапфира при различных ориентациях подложки. Пленки оксида цинка были синтезированы в окислительных условиях и в условиях пирогидролиза. Согласно данным рентгенофазового анализа пленки, осажденные в окислительных условиях, были эпитаксиальны, с ориентацией роста кристаллитов, соответствующей ориентации подложки. Пленки, изготовленные в условиях пирогидролиза, были поликристалличны. При легировании галлием, атомы галлия замещают цинк и встраиваются в междуузелия, вследствие чего часть атомов галлия остается электрически неактивной. Согласно результатам исследования края спектра рентгеновского поглощения, при легировании кобальтом пленок оксида цинка, атомы кобальта замещают цинк и находятся в зарядовом состоянии +2. Пленки оксида индия, легированные оловом, были изготовлены методом магнетронного распыления из металлоксидных и металлических мишеней. Пленки были изготовлены при различных температурах. Согласно данным просвечивающей электронной микроскопии, плёнки оксида индия, легированного оловом, синтезированные методом магнетронного распыления из оксидных мишеней, состоят из крупных кристаллитов, вытянутых перпендикулярно поверхности подложки. Толщина пленок определялась методом эллипсометрии и энерго-дисперсионного рентгеновского микроанализа, и составляла 30-90 нм

Далее в главе 2 описана методика измерения электрофизических и гальваномагнитных свойств, и представлен анализ погрешности измерений.

Измерения температурной зависимости сопротивления, магнетосопротивления и эффекта Холла проводились с использованием металлического гелиевого криостата. Измерение температуры проводилось термопарой медь-константан. Магнитное поле до 6 Тл создавалось сверхпроводящим соленоидом. Измерение магнетосопротивления и эффекта Холла проводилось стандартным четырехконтактным методом.

В главе 3 представлены результаты исследования электрофизических и гальваномагнитных свойств плёнок  $ZnO:Ga$ , синтезированных в окислительных условиях и плёнок оксида индия, легированных оловом, полученных распылением оксидной мишени.

Слабая зависимость удельного сопротивления от температуры и небольшая величина удельного сопротивления исследованных плёнок указывает на то, что перенос электронов в основном осуществляется по делокализованным состояниям зоны проводимости. При низких температурах (<30К) в температурной зависимости сопротивления пленок наблюдался рост удельного сопротивления при понижении температуры, что в вырожденных полупроводниках и металлах часто объясняют проявлением эффекта слабой локализации носителей заряда.

Зависимость э.д.с. Холла от магнитной индукции в исследованных пленках ZnO:Ga, синтезированных в окислительных условиях, и In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Sn, полученных из оксидных мишеней была линейна в интервале магнитных полей до 5 Тл. По величине коэффициента Холла были рассчитаны концентрации и подвижности электронов в пленках, что позволило оценить величину энергии Ферми и значение критерия Иоффе-Регеля. Максимальная подвижность электронов в пленках ZnO:Ga и проводимость плёнок достигается при содержании галлия около 7 %, что коррелирует с данными рентгенофазового анализа. Согласно полученным значениям энергии Ферми и подвижности, статистика электронов в пленках ZnO:Ga с содержанием галлия близком к оптимальному вырождена, и перенос электронов по состояниям зоны проводимости может рассматриваться квазиклассически.

Далее в главе 3 представлены результаты исследования магнетосопротивления пленок ZnO:Ga, синтезированных в окислительных условиях, и In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Sn, полученных из оксидных мишеней. Наблюдаемое ОМС существенно анизотропно по отношению к направлению вектора магнитного поля относительно плоскости пленки в области магнитных полей до 2 Тл и почти изотропно в более сильных магнитных полях. Разный характер угловой зависимости магнетосопротивления в сильных и слабых магнитных полях может быть проявлением изменения эффективной размерности электронной системы под действием магнитного поля вследствие изменения соотношения между магнитной длиной ( $l_B = \sqrt{\hbar/eB}$ ), длиной диффузии за время релаксации фазы волновой функции ( $L_p$ ) и толщиной пленки. Толщина исследованных пленок составляла 30-90 нм, при этом в магнитном поле с индукцией от 0.01 Тл до 1 Тл магнитная длина уменьшается от 256 нм до 25.6 нм. Таким образом в интервале магнитных полей, в котором в данной работе проводились измерения, изменяется эффективная размерность электронной системы по отношению к явлению слабой локализации.

Измерение температурной зависимости магнетосопротивления для исследованных пленок оксида цинка, легированного галлием, и оксида индия, легированного оловом, показало, что с ростом температуры величина ОМС уменьшается, и меняется характер магнетосопротивления. Данные эффекты связаны с изменением времени релаксации фазы волновой функции и эффективной размерности системы вследствие изменения температуры.

Магнетосопротивление исследованных плёнок не удается удовлетворительно описать на основе существующих выражений для квантовых поправок к проводимости, обусловленной слабой локализацией, полученных для двумерных или трёхмерных систем, в широком диапазоне магнитных полей.

Также в главе 3 изложен вывод выражения для магнетосопротивления, обусловленного слабой локализацией в условиях изменения эффективной размерности электронной системы. Полученное выражение для квантовой поправки к проводимости, обусловленное слабой

локализацией, при произвольном соотношении между толщиной плёнки, магнитной длиной и длиной диффузии электронов за время релаксации фазы волновой функции имеет вид:

$$\Delta\sigma(B) = \frac{e^2}{2\pi^2\hbar} \sum_m \left[ \ln x_m + \Psi\left(\frac{1}{x_m} + \frac{1}{2}\right) \right] \quad x_m = \frac{\omega_c}{\tau_\varphi^{-1} + D\left(\frac{\pi m}{d}\right)^2} \quad (1)$$

Где  $\omega_c = 4eB_0D/\hbar$ ,  $B_0$  – магнитное поле,  $\hbar$  – постоянная Планка,  $e$  – элементарный заряд электрона,  $d$  – толщина пленки,  $\Psi(x)$  - дигамма функция,  $D$  – коэффициент диффузии,  $\tau_\varphi$  – время релаксации фазы волновой функции.

На основе численного анализа показано, что расчеты по формуле (1), полученной в данной работе, согласуются с выражениями для двумерной и трехмерной электронной систем и с изменением размерности электронной подсистемы при изменении магнитного поля.

Далее в главе 3 представлен анализ экспериментальных зависимостей магнетопроводимости пленок оксида цинка, легированного галлием, и оксида индия, легированного оловом, на основе полученного выражения (1). На рис. 1. представлена экспериментальная магнетопроводимость плёнки оксида цинка, легированного галлием, при температуре 4,2 К, а также результат аппроксимации магнетопроводимости выражением (1), выражением для толстой пленки [1] и выражением для двумерной по отношению к слабой локализации электронной системы [2].

Соответствующие значения параметра  $L_\varphi$  представлены в подписи к рис. 1. Как видно из рис. 1, зависимость (1) аппроксимирует экспериментальную зависимость значительно лучше, чем выражение для двумерной системы. При этом значение параметра  $L_\varphi$  соответствует промежуточной размерности, то есть сравнимо с толщиной плёнки. Отметим, что экспериментальная кривая магнетосопротивления может быть аппроксимирована выражением для толстых пленок, полученным в работе [1]. Однако получающееся при этом значение  $L_\varphi = 310$  нм не согласуется с условием толстой пленки ( $d \gg L_\varphi$ ), для которого выражение для толстой пленки было получено в работе [1]. На рис. 2 представлены результаты аппроксимации выражением (1) экспериментальных данных

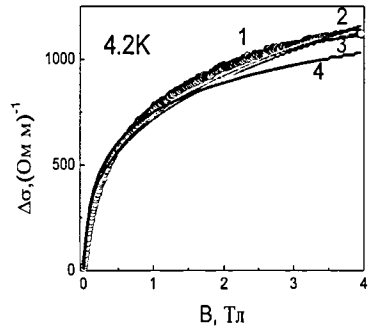


Рис.1 Сравнение теоретических зависимостей магнетопроводимости пленки ZnO:Ga  $d=60$ нм с экспериментальными данными: 1 экспериментальные данные, 2 зависимость (1) ( $L_\varphi = 187$  нм), 3 зависимость для толстых пленок [1] ( $L_\varphi = 310$  нм), 4 зависимость для 2D [2] ( $L_\varphi = 182$  нм)

магнетопроводимости пленки оксида цинка, легированной галлием, толщиной 60 нм при различных температурах. Полученные значения параметра длины  $L_\phi$  приведены в подписи к рис. 2.

В заключительном разделе главы 3 представлен анализ температурной зависимости времени релаксации фазы волновой функции в пленках оксида цинка, легированного галлием, и оксида индия, легированного оловом, выражением (1). Получено, что в пленках оксида цинка, легированного галлием, толщиной 60 нм и 90 нм и пленках оксида индия, легированного оловом, форма температурных зависимостей обратного времени релаксации фазы волновой функции соответствует электрон-электронному механизму релаксации фазы в трехмерной по отношению к электрон-электронному взаимодействию системе. Характер температурной зависимости обратного времени релаксации фазы волновой

функции для пленки оксида цинка, легированного галлием, толщиной 30 нм, иной. Длина

когерентности ( $L_T = \sqrt{\frac{\hbar D}{kT}} = 21 \text{ нм}$  при 4,2К) при низких температурах в данной пленке сопоставима с толщиной пленки, поэтому наблюдаемая зависимость обратного времени релаксации фазы волновой функции в данной пленке предположительно обусловлена двумерностью пленки по отношению к электрон-электронному взаимодействию. Полученные значения времени релаксации фазы волновой функции значительно меньше теоретических значений для основных известных механизмов релаксации фазы – электрон-электронного и электрон-фононного взаимодействия, что указывает на более сложный механизм реакции фазы волновой функции.

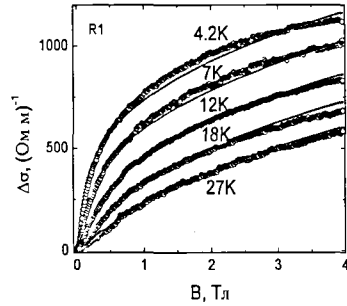


Рис.2 Экспериментальные данные магнетопроводимости плёнки ZnO:Ga толщиной 60 нм, при различной температуре (точки) и аппроксимация выражением (1) (линии): 4.2 К ( $L_\phi = 187 \text{ нм}$ ), 7 К ( $L_\phi = 132 \text{ нм}$ ), 12 К ( $L_\phi = 90 \text{ нм}$ ), 18 К ( $L_\phi = 62 \text{ нм}$ ), 27 К ( $L_\phi = 48 \text{ нм}$ )

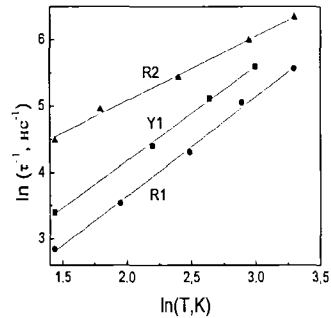


Рис.3 Зависимость логарифма обратного времени релаксации фазы волновой функции для пленок ZnO:Ga, R1 (60 нм), Y1 (90 нм), R2 (30 нм) от логарифма температуры

В главе 4 представлены результаты исследования температурной зависимости сопротивления, эффекта Холла и магнетосопротивления плёнок оксида цинка, легированного кобальтом.

Измеренные температурные зависимости сопротивления пленок оксида цинка, легированных кобальтом, существенно зависят от условия осаждения плёнок. При температуре ниже 40-50 К температурная зависимость сопротивления пленок, синтезированных в условиях пирогидроллиза, может быть описана законом Мотта для прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка для трехмерной системы. При этом сопротивление плёнок и величина параметра  $T_0$  больше в пленках с содержанием кобальта 0,4 ат.%, чем в плёнках с содержанием кобальта 1,9 ат.%.

Удельное сопротивление плёнок оксида цинка, легированного кобальтом, синтезированных в окислительных условиях, и его температурная зависимость существенно зависят от содержания кобальта. Удельное сопротивление больше у пленок с более высоким содержанием кобальта. Увеличение концентрации кобальта влияет также на характер температурной зависимости сопротивления. При низких температурах зависимость сопротивления от температуры для пленок оксида цинка, синтезированных в окислительных условиях, с содержанием кобальта более 6 ат. % хорошо описывается законом Мотта. При увеличении содержания кобальта в пленках ZnO:Co расширяется температурный диапазон, в котором температурные зависимости описываются законом Мотта. В то же время слабая зависимость сопротивления от температуры в области высоких температур, особенно для плёнок с содержанием кобальта менее 6 %, может указывать на перенос носителей заряда по делокализованным состояниям в зоне проводимости и близость уровня Ферми к зоне проводимости. Это согласуется с результатами измерений эффекта Холла при температурах выше 77 К. Так для плёнки с содержанием кобальта 1,5 ат. % коэффициент Холла практически не меняется при изменении температуры от 294 К до 77 К, а при понижении температуры от 25 К до 4,2 К наблюдается увеличение коэффициента Холла. Для плёнок, синтезированных в окислительных условиях, наблюдается тенденция усиления температурной зависимости коэффициента Холла при увеличении содержания кобальта. Наблюдаемое увеличение сопротивления при повышении концентрации кобальта может быть обусловлено увеличением энергии активации электронов, локализованных на донорных уровнях, при увеличении концентрации кобальта, из-за обменного взаимодействия с электронами d-оболочки кобальта.

Пленки ZnO:Co, синтезированные в условиях пирогидроллиза, являются поликристаллическими или частично аморфными. Наблюдаемый в данных плёнках в широком диапазоне температур закон Мотта указывает на сильную локализацию носителей заряда даже при содержании кобальта менее 1 ат. %. Полученные данные указывают на то, что удельное

сопротивление плёнок, синтезированных в условиях пиролиза, и его температурная зависимость определяются в большей степени неупорядоченностью структуры плёнок, а не примесью кобальта.

Далее в главе 4 представлены экспериментальные данные магнетосопротивления пленок ZnO:Co и их анализ. При низких температурах в данных пленках, наблюдалось большое положительное магнетосопротивление (рис. 4). В сильных магнитных полях наблюдаемое положительное магнетосопротивление насыщается или переходит в отрицательное. Величина магнетосопротивления растет при увеличении содержания кобальта. При повышении температуры величина положительного магнетосопротивления уменьшается и при определенной температуре магнетосопротивление становится отрицательным. Большое положительное магнетосопротивление в пленках оксида цинка, легированного атомами переходных металлов, наблюдалось в ряде работ других авторов, однако, механизм появления положительного магнетосопротивления остаётся дискуссионным. Наблюдаемое аномально большое положительное магнетосопротивление в пленках оксида цинка, легированного кобальтом, с прыжковым механизмом переноса носителей заряда, было проанализировано в рамках модели, в которой обменное взаимодействие между локализованными электронами, участвующими в прыжковом переносе заряда по локализованным состояниям, и неспаренными электронами ионов магнитной примеси приводит к уменьшению плотности локализованных состояний на уровне Ферми в магнитном поле. Получено в результате анализа положительного магнетосопротивления значение радиуса локализации таких состояний близко к радиусу мелких доноров в оксиде цинка.

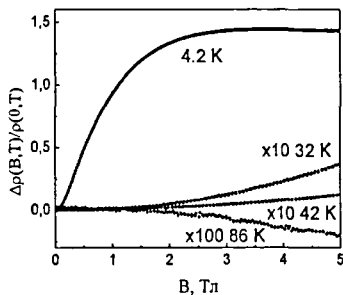


Рис. 4 Магнетосопротивление пленки ZnO:Co с содержанием Co 6.3 ат. %, синтезированной в окислительных условиях

В главе 5 представлены результаты исследования температурных зависимостей сопротивления и магнетосопротивления в пленках оксида цинка, легированных галлием, синтезированных в условиях пиролиза и в пленке оксида индия, легированной оловом, изготовленной методом магнеторонного распыления из металлической мишени в атмосфере с уменьшенным содержанием кислорода.

Было обнаружено, что удельное сопротивление плёнок, синтезированных в условиях пиролиза, значительно больше, чем пленок, синтезированных в окислительных условиях.

Температурная зависимость сопротивления пленок описывается законом Мотта для прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка в широком диапазоне температур. В пленках оксида цинка, легированного галлием, синтезированных в условиях пирогидролитического разложения, была исследована температурная зависимость магнетосопротивления. При гелиевых температурах в исследованных пленках наблюдалось положительное магнетосопротивление, величина которого уменьшалась при повышении температуры. В малых полях положительное магнетосопротивление при повышении температуры переходило в отрицательное. Было показано, что наблюдаемое положительное магнетосопротивление в полях до 2 Тл описывается в рамках модели Шкловского-Эфроса, учитывающей сжатие волновых функций локализованных состояний электронов в магнитном поле. В результате анализа магнетосопротивления были получены оценки для радиуса локализации и плотности электронных состояний на уровне Ферми. При увеличении содержания галлия вплоть до 30 ат. % увеличивается плотность локализованных электронных состояний на уровне Ферми, что согласуется с тенденцией уменьшения сопротивления данных пленок при увеличении содержания галлия. Полученная величина радиуса локализации для всех исследованных пленок значительно превышает величину эффективного борновского радиуса мелких доноров в оксиде цинка (1,3 нм), что указывает на то, что локализация электронов связана со структурными особенностями пленки, которые, согласно данным рентгенофазового анализа, состоят из случайно ориентированных кристаллитов и содержат аморфную фазу. Радиус локализации при изменении содержания галлия в данных пленках меняется слабо, что дополнительно подтверждает предположение о том, что локализованные электронные состояния, по которым осуществляется прыжковый перенос электронов, формируются вследствие структурного беспорядка, а не образования кластеров из атомов галлия.

В главе 5 также представлены результаты исследования электрофизических и гальваномагнитных свойств пленок оксида индия, легированного оловом, синтезированных в условиях дефицита кислорода. Получено, что удельное сопротивление пленок оксида индия, легированного оловом, осажденных из металлической мишени в условиях недостатка кислорода, значительно больше сопротивления пленок, синтезированных из оксидных мишеней и значительно сильнее зависит от температуры. В данных пленках при температурах ниже 80 К температурная зависимость сопротивления может быть аппроксимирована законом Мотта для двумерной электронной системы. Полученное из аппроксимации температурной зависимости сопротивления и значение радиуса локализации (35 нм) меньше толщины пленки, в то время как длина прыжка (95 нм) больше толщины пленки, что согласуется с двумерным характером температурной зависимости сопротивления. При температурах ниже 20 К температурная зависимость сопротивления описывается законом Шкловского-Эфроса для



прыжковой проводимости при наличии кулоновской щели в плотности состояний вблизи уровня Ферми. Полученная при аппроксимации этой части температурной зависимости сопротивления оценка величины радиуса локализации ( $r_{loc} = 95$  нм) превышает толщину пленки. При низких температурах в плёнках оксида индия, легированного оловом, синтезированных в условиях недостатка кислорода, наблюдалось отрицательное магнетосопротивление. Величина магнетосопротивления уменьшается при повышении температуры и выше 40К становится неизмеримо малой. Наблюдаемое магнетосопротивление сильно анизотропно (рис.5). При увеличении угла между нормалью к поверхности пленки и вектором магнитной индукции величина отрицательного магнетосопротивления уменьшается, и при некотором угле магнетосопротивление переходит в положительное. Положительное магнетосопротивление может быть обусловлено сжатием волновых функций в магнитном поле. Наблюдаемое отрицательное магнетосопротивление было проанализировано в рамках модели, учитывающей интерференцию электронов при туннелировании в системах с прыжковым переносом электронов (рис. 6). В результате получена оценка радиуса локализации  $r_{loc} = 40$  нм, что согласуется с оценками, полученными из температурной зависимости сопротивления. Согласно полученным оценкам радиуса локализации, прыжковая проводимость в данных плёнках носит двумерный характер, что подтверждается наблюдаемыми температурными зависимостями сопротивления и угловой зависимостью магнетосопротивления при низких температурах. Полученные оценки радиуса

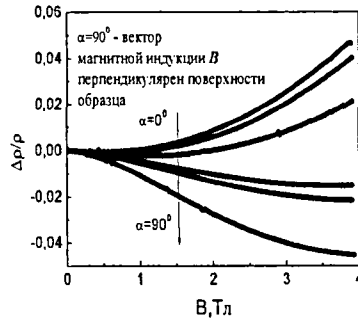


Рис.5 Угловая зависимость относительного изменения магнетосопротивления для пленки оксида индия, легированной оловом, синтезированной в условиях дефицита кислорода. Каждая кривая соответствует повороту пленки на 15 градусов

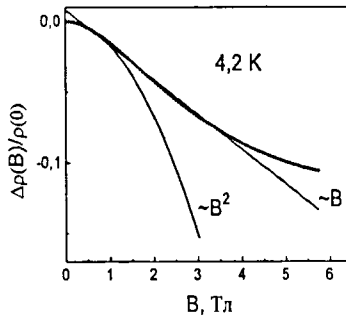


Рис.6 Экспериментальная и теоретические зависимости относительного изменения магнетосопротивления для исследованной пленки  $In_2O_3:Sn$ , синтезированной в условиях дефицита кислорода, при 4,2К

локализации для пленок оксида цинка, легированного галлием, синтезированных в условиях пирогидролиза и пленок оксида индия, легированного оловом, синтезированных в условиях недостатка кислорода, указывают на то, что локализация электронов в данных плёнках обусловлена разупорядоченностью структуры данных плёнок, что согласуется с данными структурных исследований.

#### Основные результаты и выводы

- 1) Электрофизические и гальваномагнитные свойства плёнок оксида цинка, легированного галлием и кобальтом, а также плёнок оксида индия, легированного оловом, исследованы в диапазоне температур от 4,2 К до 295 К в магнитных полях до 6 Тл.
- 2) При легировании галлием подвижность электронов в плёнках  $ZnO:Ga$ , осаждённых в окислительных условиях, достигает максимума при содержании галлия, близком к 7 ат. %, что коррелирует с данными рентгенофазового анализа, указывающими на резкое уменьшение размеров кристаллитов в плёнках при содержании галлия превышающем 7-8 ат. %. Установлено, что при содержании галлия, близком к 7 ат. % в плёнках преобладает зонный механизм проводимости, а статистика электронов вырождена уже при комнатной температуре.
- 3) В плёнках оксида цинка, легированного галлием, осажденных в условиях пирогидролиза, наблюдается прыжковая проводимость с переменной длиной прыжка. При увеличении содержания галлия вплоть до 30 ат. % увеличивается плотность локализованных электронных состояний на уровне Ферми. Радиус локализации при изменении содержания галлия в данных плёнках меняется слабо.
- 4) В плёнках оксида цинка, легированного кобальтом, при низких температурах наблюдается аномальное положительное магнетосопротивление, величина которого увеличивается при увеличении содержания кобальта. Аномальное положительное магнетосопротивление в плёнках оксида цинка, легированных кобальтом, может быть объяснено уменьшением плотности электронных состояний в магнитном поле вследствие обменного взаимодействия между электронами ионов кобальта и электронами проводимости и случайного расположения ионов кобальта относительно локализованных электронных состояний, участвующих в электропроводности. Получено значение радиуса локализации таких состояний близкое к радиусу мелких доноров в оксиде цинка.
- 5) Электропроводность и подвижность электронов в плёнках оксида индия, легированного оловом, синтезированных методом магнетронного распыления оксидной мишени, увеличиваются при увеличении температуры подложки. В плёнках этого типа реализуется зонный механизм электропроводности, а статистика электронов вырождена даже при комнатной температуре.

6) В плёнках оксида индия, легированного оловом, осаждённых магнетронным распылением металлической мишени в условиях недостатка кислорода, при температурах 4,2К-80К наблюдается прыжковая проводимость с переменной длиной прыжка. Для данных плёнок получены оценки радиуса локализации и плотности электронных состояний на уровне Ферми и показано, что плёнки являются двумерными по отношению к прыжковой проводимости.

7) Для магнетосопротивления, обусловленного слабой локализацией, получено выражение, действительное при изменении размерности плёнки по отношению к явлению слабой локализации под действием магнитного поля. Выведенное выражение полностью описывает экспериментальные данные по магнетосопротивлению, обусловленному явлением слабой локализации, при изменении размерности пленки.

8) В результате анализа отрицательного магнетосопротивления при низких температурах плёнок оксида цинка, легированного галлием и оксида индия, легированного оловом, получены значения и температурные зависимости времени релаксации фазы волновой функции  $\tau_\phi$ . Показано, что температурные зависимости могут быть описаны степенной функцией с показателем степени соответствующей электрон-электронному механизму релаксации фазы. Полученные значения времени релаксации фазы волновой функции меньше теоретических значений для основных известных механизмов релаксации фазы – электрон-электронного и электрон-фононного.

#### Список цитируемой литературы

1. Волков В.А. Квантовые поправки к поверхностной проводимости неупорядоченного металла // *Письма в ЖЭТФ* -1982- т.36 – в.11- с.394

2. Altshuler B.L., Aronov A.G. Electron- electron interaction in disordered conductors// *Modern Problems in Condensed Matter Sciences* – 1985- v.10- ch.1 -p. 1

#### Список публикаций по теме диссертации

1) О.В. Реукова, В.Г. Кытин, В.А. Кульбачинский, Л.И. Бурова, А.Р. Кауль Магнетосопротивление тонких пленок, обусловленное слабой локализацией, в условиях изменения размерности системы под действием магнитного поля и температуры//*Письма в ЖЭТФ* – 2015- т. 101 - вып. 3 - с. 207-211.

2) В.А. Кульбачинский, В.Г. Кытин, О.В. Реукова, Л.И. Бурова, А.Р. Кауль, А.Г. Уляшин Процессы переноса электронов, низкотемпературные электрические и гальваномагнитные свойства пленок оксидов цинка и индия // *ФНТ* -2015- в. 41- № 2 - с. 153–164.

3) V.G. Kytin, V.A. Kulbachinskii, O.V. Reukova, Y.M. Galperin, T. H. Johansen, S. Diplax, A.G. Ulyashin Conducting properties of  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$  thin films at low temperatures // *Appl. Phys. A* – 2014- vol. 114 - Issue 3 - pp 957-964.

- 4) В.Г. Кытин, В.А. Кульбачинский, Д.С. Глебов, Л.И. Бурова, А.Р. Кауль, О.В. Реукова, Электропроводность и магнитные свойства тонких пленок оксида цинка, легированного кобальтом //ФТП – 2010 - в.44 – 2 - с. 164-169.
- 5) В.Г. Кытин, В.А. Кульбачинский, Д.С. Глебов, Л.И. Бурова, А.Р. Кауль, О.В. Реукова, Электропроводность ферромагнитных пленок  $Zn_{1-x}Co_xO$  // ЖЭТФ – 2010 - в. 111 - 2 - с. 225-230.
- 6) V.G. Kytin, O.V. Reukova, V.A. Kulbachinskii, L.I. Burova, A.R. Kaul, A.G. Ulyashin, Features of the hopping conductivity in gallium and cobalt doped ZnO thin films // J. Phys.: Conf. Ser. – 2014 – vol. 568 – p. 052015 (Proceedings of 27<sup>th</sup> International Conference on Low Temperature Physics).
- 7) O.V. Reukova, V.G. Kytin, V.A. Kulbachinskii, L.I. Burova, A.R. Kaul, A.G. Ulyashin, Weak localization in ZnO:Ga and ZnO:Al thin films // J. Phys.: Conf. Ser. - 2014 – vol. 568 – p. 052025 (Proceedings of 27<sup>th</sup> International Conference on Low Temperature Physics).

#### Тезисы докладов научных конференций

- 1) В.А. Кульбачинский, В.Г. Кытин, О.В. Реукова, Электрофизические и гальваномагнитные свойства пленок смешанного оксида индия и олова, Сборник аннотаций работ 7 Курчатовской молодежной научной школы, РИЦ "Курчатовский институт" 10-12 ноября 2009 г., стр. 206.
- 2) V.G. Kytin, V.A. Kulbachinskii, D.S. Glebov, O.V. Reukova, L.I. Burova, A.R. Kaul, Electron transport in thin ferromagnetic  $Zn_{1-x}Co_xO$  films, International Conference "Functional Materials", Ukraine, Crimea, Partenit, October 5-10, 2009, p.176.
- 3) О.В. Реукова, В.Г. Кытин, В.А. Кульбачинский Электропроводность и гальвано-магнитные свойства проводящих оксидов индия и цинка при низких температурах XXXV Совещание по физике низких температур (НТ-35), Черногоровка, Россия 29 сентября - 2 октября 2009 г. Тезисы докладов., М. Граница, 2009 г., с. 272-273.
- 4) В.Г. Кытин, В.А. Кульбачинский, Д.С. Глебов, О.В. Реукова Электропроводность ферромагнитных плёнок  $Zn_{1-x}Co_xO$  при низких температурах XXXV Совещание по физике низких температур (НТ-35), Черногоровка, Россия 29 сентября - 2 октября 2009 г. Тезисы докладов., М. Граница, 2009 г., с. 236-237.
- 5) В.А. Кульбачинский, В.Г. Кытин, О.В. Реукова, Л.И. Бурова, А.Р. Кауль, Ю.М. Гальперин, А.Г. Ульяшин, Электронные свойства проводящих прозрачных оксидов цинка и индия, XIX Уральская международная зимняя школа по физике полупроводников, 20-25 февраля 2012 г., Екатеринбург-Новоуральск, Программа и тезисы докладов 2012, стр. 124-125.
- 6) Реукова О.В., Кытин В.Г., Кульбачинский В.А., Мельник Д.Д., Бурова Л.И., Кауль А.Р., Квантовые поправки к проводимости в тонких пленках ZnO:Ga, XX Уральская международная зимняя школа по физике полупроводников, Екатеринбург-Новоуральск, 17-22 февраля, 2014, Программа и тезисы докладов, 108-109.

- 7) Кытин В.Г., Реукова О.В., Глебов Д.С., Мельник Д.Д., Бурова Л.И., Кауль А.Р., Кульбачинский В.А., Особенности прыжковой проводимости в пленках ZnO:Co, XX Уральская международная зимняя школа по физике полупроводников, Екатеринбург-Новоуральск, 17-22 февраля, 2014, Программа и тезисы докладов, 232-233.
- 8) Kytin V.G., Reukova O.V., Melnik D.D., Burova L.I., Kaul A.R., Kulbachinskii V.A., Features of the hopping conduction in gallium and cobalt doped zinc oxide thin films at low temperatures, 27th International Conference on Low Temperature Physics, Buenos Aires, Argentina, 2014, Abstracts book, 0430, pages 112-113.
- 9) Reukova O.V., Kytin V.G., Burova L.I., Kaul A.R., Kulbachinskii V.A., Ulyashin A.G. Weak localization in ZnO:Ga and ZnO:Al thin films, 27th International Conference on Low Temperature Physics, Buenos Aires, Argentina, 2014, Abstracts book, 0686, page 170.
- 10) Kytin V.G., Reukova O.V., Melnik D.D., Burova L.I., Kaul A.R., Kulbachinskii V.A. Effect of doping on the structure, magnetic and galvanomagnetic properties of ZnO thin films, Moscow International Symposium on Magnetism, Moscow, 29 June-3 July 2014, Book of Abstract, p.508
- 11) Kulbachinskii V.A., Kytin V.G., Reukova O.V., Galperin Yu.M., Diplas S., Ulyashin A.G. Effect of hydrogen plasma treatment and oxygen deficiency on conducting properties of  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$  thin films at low temperatures 5th International Symposium on Transparent Conductive Materials, Platania - Chania, Crete, Greece, 12-17 October 2014, Poster session 1 Presentation, p.11.
- 12) Reukova O.V., Kytin V.G., Kulbachinskii V.A., Burova L.I., Kaul A.R., Ulyashin A.G., Galvanomagnetic and electrophysical properties of ZnO:Ga and ZnO:Al Thin Films, 5th International Symposium on Transparent Conductive Materials, Platania - Chania, Crete, Greece, 12-17 October 2014, Poster session 1 Presentation, p.34.
- 13) Kytin V.G., Reukova O.V., Burova L.I., Kaul A.R., Kulbachinskii V.A., 5th International Symposium on Transparent Conductive Materials, Platania - Chania, Crete, Greece, 12-17 October 2014, Poster session 1 Presentation, p.117.
- 14) Реукова О.В., Влияние магнитной примеси Co на гальваномагнитные свойства пленок ZnO, Российская молодежная конференция по физике и астрономии, ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 28-30 октября 2014, Тезисы докладов Российской молодежной конференции по физике и астрономии, стр.84-86.

Подписано в печать: 05.08.2015

Заказ № 10885 Тираж - 100 экз.

Печать трафаретная.

Типография «11-й ФОРМАТ»

ИНН 7726330900

115230, Москва, Варшавское ш., 36

(499) 788-78-56

[www.autoreferat.ru](http://www.autoreferat.ru)