

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники»

На правах рукописи



Жидик Юрий Сергеевич

**Прозрачные омические контакты для изделий гетероструктурной
полупроводниковой оптоэлектроники**

01.04.04 – физическая электроника

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
Троян Павел Ефимович,
доктор технических наук,
профессор

ТОМСК 2019

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. Плёнки ITO: Технология синтеза, структура, свойства	15
1.1 Структура и свойства тонких плёнок ITO	15
1.1.1 Электрические свойства плёнок ITO	16
1.1.2 Оптические свойства плёнок ITO	20
1.2 Вакуумные методы осаждения плёнок ITO	22
1.2.1 Синтез плёнок ITO методом магнетронного распыления	25
1.2.2 Воздействие плазмы магнетронного разряда на подложку и растущую пленку	31
1.2.3 Методы отвода заряженных частиц от подложки и конденсирующейся на ней плёнки в процессе магнетронного распыления	38
1.2.4 Синтез плёнок ITO методом электронно-лучевого испарения	42
Выводы к главе 1 и формулировка цели диссертационной работы	43
ГЛАВА 2. Технология изготовления образцов. Структура и свойства плёнок ITO	45
2.1 Технологическое, измерительное и аналитическое оборудование. Методики исследований свойств плёнок ITO	45
2.1.1 Методика измерения поверхностного сопротивления тонких плёнок.....	46
2.1.2 Методика измерения концентрации и подвижности носителей заряда	47
2.1.3 Методика исследования электропроводности плёнок	50
2.1.4 Методика исследования термо-ЭДС плёнок ITO	55
2.2 Методика приготовления исследуемых образцов	56
2.3 Технологии осаждения плёнок ITO методом реактивного магнетронного распыления.....	58
2.5 Электрические свойства плёнок ITO	66
2.5 Температурная стабильность электрических свойств плёнок ITO	70
2.6 Стабильность электрических свойств плёнок ITO при выполнении операции фотолитографии	72
2.7 Механизмы электропроводности плёнок ITO.....	73

Выводы к главе 2.....	78
ГЛАВА 3. Осаждение плёнок ITO методом реактивного магнетронного распыления с устранением радиационного воздействия плазмы магнетронного разряда.....	79
3.1 Напыление плёнок ITO с применением магнитной отклоняющей системы..	80
3.1.1 Разработка магнитной отклоняющей системы	80
3.1.2 Методика исследования эффективности отвода заряженных частиц от подложки и конденсирующейся на ее поверхности плёнки в процессе магнетронного распыления магнитной отклоняющей системой.....	87
3.1.3 Исследование эффективности уменьшения радиационного воздействия плазмы магнетронного разряда на подложку и растущую плёнку.....	89
3.2 Свойства плёнок ITO, напыленных методом реактивного магнетронного распыления с уменьшением радиационного воздействия плазмы магнетронного разряда.....	91
Выводы к главе 3	95
ГЛАВА 4. Применение плёнок ITO в оптоэлектронных приборах.....	96
4.1 Применение плёнок ITO в качестве прозрачного проводящего контакта для электрооптических модуляторов на основе гетероэпитаксиальных структур InP96	
4.1.1 Методика измерения контактного сопротивления ITO/ <i>p</i> -InGaAs	100
4.1.2 Исследование омических характеристик контакта ITO/ <i>p</i> -InGaAs.....	102
4.1.3 Разработка технологического маршрута изготовления электрооптического модулятора в бескорпусном исполнении с омическим самосовмещенным контактом ITO/ <i>p</i> -InGaAs.....	105
4.2 Просветляющие покрытия для изделий оптоэлектроники и радиофотоники	109
4.3 Применение плёнок ITO в качестве слоя растекания тока для светодиодов на основе гетероэпитаксиальных структур AlInGaN	115
4.3.1 Среда для моделирования светодиода на основе гетероструктуры GaN/AlInGaN/GaN со слоем растекания тока ITO.....	116
4.3.2 Моделирование светодиода на основе гетероструктуры GaN/AlInGaN/GaN со слоем растекания тока ITO.....	118

Выводы к главе 4	130
Заключение	132
Список литературы	134
Приложение А. Акты внедрения	152
Приложение Б. Результаты интеллектуальной деятельности	155

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Стремительное развитие электронной промышленности задает темпы создания принципиально новых устройств, реализующих свою функциональность за счёт особенностей зонной структуры, эффектов размерного квантования, явлений, возникающих на гетерограницах. Одними из таких устройств являются устройства оптоэлектроники и радиофотоники, работа которых связана с генерацией и управлением светового излучения.

Устройства оптоэлектроники и радиофотоники используются для многочисленных целей, среди которых освещение, индикация, телекоммуникации, микроволновые фотонные связи. Специфика работы таких устройств обуславливает необходимость применения не только сложных гетероструктур, содержащих многочисленные квантовые ямы, нити и точки, но и принципиально новых подходов к проектированию их конструкции и новых материалов. Так, например, формирование на поверхности гетероэпитаксиальных структур оптоэлектронных приборов различных функциональных покрытий позволяет решить проблемы, связанные с устранением эффектов полного внутреннего отражения сгенерированного излучения, защитой полупроводникового кристалла от внешних воздействий, формированием оптически прозрачных электропроводящих омических контактов к структурам, не препятствующих прохождению через них светового излучения и способствующих более равномерному распределению тока по поверхности гетероэпитаксиальной структуры, избегая его стягивания вблизи металлических контактов, что является наиболее значимой задачей из перечисленных.

Наиболее перспективным материалом для оптически прозрачных омических контактов устройств оптоэлектроники и радиофотоники сегодня является оксид индия, легированный атомами олова (indium tin oxide – ITO). Согласно отчету «Touch-Panel-Use Transparent Conductive Film Report – 2013» плёнки ITO занимают 95% рынка прозрачных электропроводящих покрытий для сенсорных

экранов. Несмотря на то что современные технологии нанесения покрытий на основе оксида индия обеспечивают коэффициент пропускания более 80%, их удельное поверхностное сопротивление составляет $2 \cdot 10^{-3}$ Ом·см. Таким образом, предел использования плёнок ITO с указанными характеристиками в сенсорных панелях ограничен размером диагонали 15 дюймов, что обуславливает необходимость уменьшения удельного сопротивления этих плёнок.

Существует много методов нанесения плёнок ITO: термическое осаждение, реактивное магнетронное распыление, импульсно-лазерное осаждение, послойное атомное осаждение, золь-гель-метод, газофазное осаждение и др. Однако до сих пор остаются нерешенными некоторые проблемы их нанесения на гетероэпитаксиальные структуры при изготовлении оптоэлектронных приборов. Связано это с тем, что осаждение тонкопленочных функциональных слоев наиболее перспективно производить методом магнетронного распыления, который имеет значительные преимущества в технологичности и гибкости процесса осаждения, обеспечивает повышенную адгезию, напыление многокомпонентных материалов. Однако при нанесении покрытий вакуумными ионно-плазменными методами гетероэпитаксиальная структура существенно подвергается бомбардировке высокоэнергетичными заряженными частицами, что вызывает в ней появление радиационных дефектов и, как следствие, приводит к ее деградации.

В научном и прикладном аспекте важны исследования по установлению влияния технологии синтеза плёнок ITO методом реактивного магнетронного распыления на их электрические и оптические свойства. Исследования свойств плёнок прозрачных проводящих оксидных материалов вызваны их востребованностью при формировании элементов тонкопленочной оксидной электроники.

Таким образом, разработка технологии получения и исследование свойств тонких плёнок ITO для создания омических контактов к полупроводниковым

гетероструктурам на основе соединений группы A_3B_5 является актуальной задачей.

Объект исследования: структуры ИТО/полупроводник p -типа проводимости гетероструктур для приборов оптоэлектроники и радиофотоники, тонкие плёнки ИТО, полученные методом реактивного магнетронного распыления мишени In/Sn в кислородосодержащей среде со сниженным радиационно-термическим воздействием на подложку.

Предмет исследования: технология формирования тонких плёнок ИТО методом реактивного магнетронного распыления со сниженным радиационно-термическим воздействием на подложку, электрофизические свойства пленок ИТО и формирование прозрачных омических контактов для изделий гетероструктурной полупроводниковой оптоэлектроники.

Цель исследования: разработка физико-химических основ технологии получения тонких низкоомных прозрачных плёнок ИТО методом магнетронного распыления при сниженном радиационно-термическом воздействии на подложку, исследование свойств пленок ИТО и формирование прозрачных омических контактов к изделиям гетероструктурной оптоэлектроники.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. разработка физико-химических основ технологии получения тонких плёнок ИТО с удельным поверхностным сопротивлением менее $1 \cdot 10^{-3}$ Ом·см при интегральном коэффициенте пропускания в видимой области более 85%;
2. разработка метода уменьшения радиационного воздействия плазмы магнетронного разряда на подложку при нанесении плёнок ИТО методом реактивного магнетронного распыления;
3. исследование электрофизических свойств плёнок ИТО, нанесенных методом реактивного магнетронного распыления с уменьшением радиационно-термического воздействия на растущую пленку;

4. исследование влияния радиационно-термического воздействия плазмы магнетронного разряда на свойства плёнок ITO при их напылении методом реактивного магнетронного распыления;

5. апробирование разработанных приемов напыления плёнок ITO при изготовлении омических контактов оптоэлектронных гетероструктурных полупроводниковых приборов.

Теоретико-методологические основания и методы исследования

Теоретическим основанием данного исследования послужили работы зарубежных и российских ученых по различным научным дисциплинам: физике, химии, электронике, электротехнике.

При выполнении исследований использовались экспериментальные методы (эксперимент, метод сравнения), а также эмпирическо-теоретические методы (метод аналогий, метод абстрагирования, метод индукции и дедукции). Большое количество данных получено в ходе физического эксперимента на объектах исследования с применением разрушающих и неразрушающих методов контроля (проведение электрических, оптических исследований, исследований структуры с помощью рентгенофазного анализатора, исследований поверхности методом растровой электронной микроскопии). Обработка экспериментальных данных проводилась с использованием специализированных программ.

Научная новизна

1. Установлено, что при нанесении оптически прозрачных пленок ITO на слой p-InGaAs гетероструктуры формируется омический контакт.

2. Предложена новая методика нанесения оптически прозрачных плёнок ITO методом магнетронного распыления с устранением электронно-ионной бомбардировки подложки.

3. Доказано, что отжиг плёнок ITO при температуре более 300 °C приводит к образованию вырожденного полупроводника n-типа. При этом уровень Ферми занимает положение выше дна зона проводимости на 0,09 эВ.

Теоретическая значимость работы

1. Получены новые знания о влиянии радиационно-термического воздействия плазмы магнетронного разряда на свойства плёнок ИТО при их нанесении методом реактивного магнетронного распыления.

2. Получены новые научные знания об электрофизических свойствах прозрачных проводящих плёнок ИТО, наносимых методом реактивного магнетронного распыления.

3. Установлен механизм формирования омического контакта оптически прозрачных плёнок ИТО к слоям *p*-InGaAs.

Практическая значимость работы

1. Разработаны физико-химические основы синтеза электропроводящих оптически прозрачных плёнок ИТО методом реактивного магнетронного распыления с возможностью их нанесения на гетероэпитаксиальные полупроводниковые структуры.

2. Разработан способ уменьшения радиационно-термического воздействия плазмы магнетронного разряда на подложку при нанесении тонкопленочных покрытий методом магнетронного распыления.

3. Показана перспектива применения плёнок ИТО в качестве слоя растекания в приборах оптоэлектроники. Методом моделирования показано, что введение слоя растекания тока позволяет увеличить КПД прибора более чем на 50 %.

Положения, выносимые на защиту

1) Изменение конфигурации магнитного поля с помощью разработанной отклоняющей системы позволяет в 13,2 раза уменьшить радиационное и термическое воздействие на подложку за счет уменьшения потока попадающих на нее заряженных частиц.

2) Отжиг плёнок ИТО при температурах выше 300 °С приводит к необратимой смене механизма электропроводности от полупроводникового к металлическому.

3) Использование плёнок ITO позволяет получить оптически прозрачный омический контакт к p -InGaAs с контактным сопротивлением 10^{-4} – 10^{-5} Ом·см².

Достоверность результатов работы

Достоверность полученных в ходе исследований результатов подтверждается: корреляцией с данными известных работ других авторов по аналогичным и смежным тематикам; применением современного аналитического и измерительного оборудования; корреляцией между собой экспериментальных результатов, полученных на различном оборудовании; корреляцией результатов проведенного моделирования с полученными экспериментальными данными; апробацией полученных теоретических и экспериментальных результатов на конференциях и семинарах различного уровня; публикацией статей, содержащих полученные результаты, в рецензируемых журналах; наличием результатов интеллектуальной деятельности; внедрением результатов исследований в промышленное производство.

Внедрение результатов работы. Результаты диссертационной работы использованы в ходе выполнения следующих научно-исследовательских работ:

– ПНИЭР «Создание отечественных электрооптических модуляторов на основе квантово-размерного эффекта Штарка для высокоскоростных 400 Гбит/с волоконно-оптических систем передачи информации», выполняемой при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках соглашения № 14.577.21.0281 от 23.10.2017, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57717X0281;

– проектная часть государственного задания № 8.4029.2017/ПЧ «Исследование методов построения интегрированных микроэлектронных и радиофотонных устройств на базе гетероструктурных технологий для перспективных межвидовых комплексов локации, навигации и связи с многоканальными фазированными антенными решетками», выполняемая при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, 2017–2019 гг.;

– научный проект № 18-32-00708 «Физические основы формирования функциональных тонкопленочных покрытий методом ионно-плазменного распыления на поверхности гетероструктур пониженной размерности без образования в них радиационных дефектов», выполняемый при финансовой поддержке РФФИ;

– научный проект № 18-29-11037 «Новые наноструктурированные функциональные материалы на основе сложных оксидов для оптически прозрачных электродов в устройствах фотовольтаики», выполняемый при финансовой поддержке РФФИ;

– проект фундаментальных исследований РАН № 0293-2019-0006 «Исследование и разработка базовых принципов построения элементов радиодетекторного тракта с частотами до 1 ТГц и построения систем на их основе», выполняемый при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ;

– научный проект «Теоретические и экспериментальные исследования сверхширокополосных оптоэлектронных устройств волоконно-оптических систем передачи информации и радиодетекторной на основе фотонных интегральных схем собственной разработки», выполняемый коллективом научной лаборатории «Лаборатория интегральной оптики и радиодетекторной» при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ;

– ОКР «Разработка базовой технологии изготовления особо плоских ОСИД-дисплеев методом принтерной печати», выполненная при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по государственному контракту № 12411.1006899.11.055 от 05.04.2012;

– хоздоговорная работа № 73/10 от 15.07.2010 «Разработка высокоэффективных и надежных полупроводниковых источников света и светотехнических устройств и организация их серийного производства», выполненная в рамках Постановления Правительства РФ № 218.

Результаты диссертационной работы использованы: в промышленном производстве электрохромных панелей открытым акционерным обществом «Тинт-ит» при отработке технологии напыления низкоомных плёнок ITO на

листовое стекло; для проведения научных исследований процессов электрополимеризации порфиринов лабораторией «Новые материалы на основе макрогетероциклических соединений» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института химии растворов им. Г.А. Крестова РАН.

Материалы диссертационной работы используются в учебном процессе на факультете электронной техники ТУСУРа при чтении курса лекций и проведении лабораторных работ по дисциплине «Вакуумно-плазменные методы получения микро- и наноструктур» для подготовки специалистов по направлениям 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника» и 11.03.04 «Электроника и микроэлектроника».

Апробация результатов работы

Основные результаты исследований докладывались и обсуждались:

на всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР» (г. Томск, 2011, 2012, 2013, 2014, 2016, 2017); 50-й международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс» (г. Новосибирск, 2012); международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии», (г. Томск, 2012, 2013, 2014); XI международной конференции «Пленки и покрытия – 2013» (Санкт-Петербург, 2013); всероссийской научной конференции с международным участием «Полифункциональные химические материалы и технологии» (г. Томск, 2013, 2019); международной конференции молодых специалистов по микронанотехнологиям и электронным приборам «EDM» (г. Новосибирск, 2014, 2019); 5-й международной научно-практической конференции «Технология микро- и микроэлектроники в наносистемной технике» (г. Москва, 2016); международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» (г. Томск, 2016, 2017, 2018); IV международной научной конференции студентов и молодых ученых «Молодежь, наука, технологии: новые идеи и перспективы» (г. Томск, 2017); XII всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии.

Инновации» (г. Новосибирск, 2018); International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2019 (Томск, 2019); 14-й международной конференции «Газоразрядные плазмы и их применение» (Томск, 2019).

Личный вклад автора

Все результаты, составляющие научную новизну и выносимые на защиту, получены автором лично. Цели и задачи научного исследования поставлены совместно с научным руководителем. В работе над конструкцией магнитной отклоняющей системы принимали участие д-р техн. наук, профессор П.Е. Троян, канд. техн. наук, доцент Ю.В. Сахаров.

Автором самостоятельно спланировано и проведено большинство экспериментов по исследованию электрических и оптических свойств плёнок *ITO* (приготовление экспериментальных образцов плёнок *ITO*, выполнение основной части измерений и обработки полученных экспериментальных результатов); проведен анализ, интерпретация и обобщение полученных экспериментальных результатов, сформулированы расширенные научные выводы по каждой главе диссертации, а также обобщенный вывод по диссертационной работе. Совместно с автором в обсуждении экспериментальных результатов принимали участие д-р техн. наук, профессор П.Е. Троян, д-р техн. наук, профессор С.В. Смирнов, канд. техн. наук, доцент Ю.В. Сахаров, канд. техн. наук С.В. Ишуткин, канд. техн. наук И.В. Юнусов, начальник лаборатории световых модулей (ЛСМ) НИИПП г. Томск Д.Д. Каримбаев.

Автором проведен значительный литературный обзор по строению, свойствам и существующим технологиям синтеза тонких плёнок *ITO*.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 159 страницах, состоит из введения, 4 глав, заключения и списка цитируемой литературы, содержит 56 рисунков, 15 таблиц и 2 приложения. Список литературы состоит из 39 наименований авторских публикаций и 111 наименований цитируемых источников.

Публикации по теме диссертации. Всего по результатам исследований опубликовано 39 работ, из них 10 в рецензируемых изданиях из перечня ВАК

Министерства науки и высшего образования РФ, 8 докладов на российских конференциях, 16 докладов на международных конференциях (из них 5 индексируется базами данных Scopus), 3 патента, 2 свидетельства о регистрации топологий интегральных схем.

ГЛАВА 1. Плёнки ITO: Технология синтеза, структура, свойства

Данная глава посвящена обзору научных работ, освещающих современное состояние исследований, посвященных синтезу тонких плёнок ITO и исследованию их структурных, электрических и оптических свойств.

1.1 Структура и свойства тонких плёнок ITO

Оксид индия имеет структуру, представляющую объемно-центрированную кубическую решётку, в которой атомы индия и кислорода послойно чередуются, и напоминает структуру биксбиита [15] (рисунок 1.1). На одну элементарную ячейку биксбиита приходится 16 формульных единиц кристаллической структуры оксида In_2O_3 [16-18].

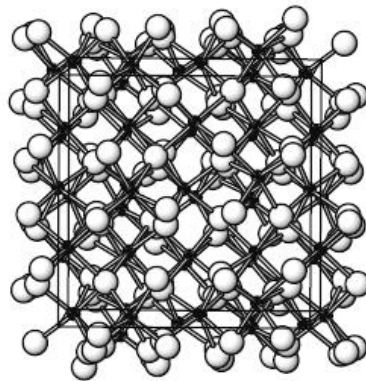


Рисунок 1.1 – Структура ОЦК решётки In_2O_3
(In – маленькие шарики, O – большие шарики)

При легировании In_2O_3 атомами Sn^{4+} , которые замещают ионы In^{3+} нарушается локальная электронейтральность и образуется ITO [19 – 21]. Кубическая структура биксбиита сохраняется при легировании оловом до предела растворимости Sn в In_2O_3 , который варьируется между 4 и 8 атомарными % Sn [15].

Электрические и оптические свойства прозрачных проводящих оксидов являются функцией кристалличности материала. В работах [22-25] показано, что

плёнки ИТО, осажденные при температуре 300К, являются аморфными. При более высоких температурах в структуре пленок преобладает кристаллическая фаза [25].

Кристаллизация плёнок начинается при температуре подложки от 150°C [25] до 200 °С [26]. При дальнейшем увеличении температуры подложки за счет большей подвижности адатомов наблюдается рост размеров кристаллитов и увеличение структурного совершенства плёнок ИТО, а так же активация примесных атомов [25 - 28].

1.1.1 Электрические свойства плёнок ИТО

Оксид индия является широкозонным полупроводником *n*-типа проводимости (рисунок 1.3) [29]. Электропроводность оксида индия обусловлена отклонением его состава от стехиометрии [30]. Электроны проводимости в таких пленках доставляются из донорных состояний, наличие которых вызвано наличием кислородных вакансий или избытком ионов индия.

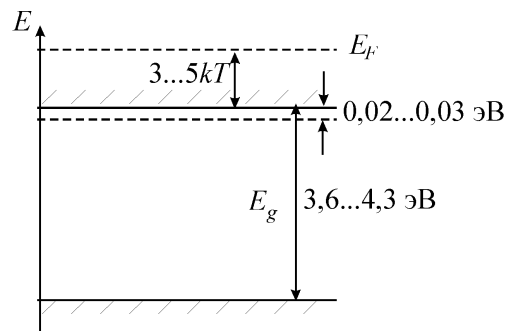


Рисунок 1.3 – Зонная диаграмма оксида индия In_2O_3 [29]

Наличие кислородных вакансий в пленках прозрачных проводящих оксидов обусловлено большому дефициту кислорода даже в условиях равновесного роста [31]. Формула оксида индия имеет вид: $\text{In}_2\text{O}_{3-x}(\text{V})_x$, где V — дважды заряженная вакансия кислорода, поставляющая в зону проводимости два электрона. Значения параметра x обычно составляет менее 0,01 [32]. Концентрация свободных электронов находится в диапазоне 10^{19} – 10^{20} см^{-3} . Для повышения концентрации

свободных электронов в плёнках ИТО производят путем их легирования четырехвалентным оловом (замещающим ионы индия) а также образованием кислородных вакансий во время роста плёнок или в результате проведения высокотемпературного отжига, проводимого после осаждения. Указанные операции приводят к формированию плёнок ИТО в виде: $\text{In}_{2-y}\text{Sn}_y\text{O}_{3-2y-x}(\text{V})_x$. Концентрация свободных электронов возрастает до 10^{21} см^{-3} , а их подвижность лежит в диапазоне от 10 до $50 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$.

Стоит отметить, что для любых процессов легирования прозрачных проводящих оксидов существует оптимальный уровень легирования, который приводит к минимальному сопротивлению (рисунок 1.4) [31].

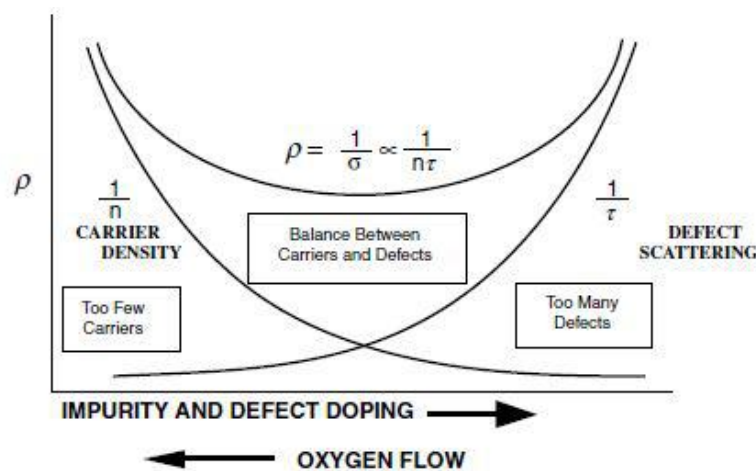


Рисунок 1.4 – Качественная модель легирования прозрачных проводящих оксидов [31]

С одной стороны, рассеяние электронов проводимости на примесных и внедрённых атомах, кислородных вакансиях, фононах, дефектах, границах зёрен при низких уровнях легирования значительно понижает их подвижность и приводит к увеличению сопротивления плёнок прозрачных проводящих оксидов. С другой стороны, в сильно вырожденных пленках преобладающим механизмом является рассеяние на ионизированной примеси.

Вопрос существования электронной проводимости в прозрачных проводящих оксидах однозначно не решен по причине присутствия одновременного взаимодействия как минимум двух механизмов: донорная

электропроводность, обусловленная наличием донорных кислородных вакансий и примесная, вызванная примесными атомами олова.

Концентрация свободных электронов в пленках ИТО определяется концентрацией кислородных вакансий и примесных атомов олова. На рисунке 1.5 приведена зависимость сопротивления плёнок ИТО от степени легирования примесным оловом, приведенное в [31].

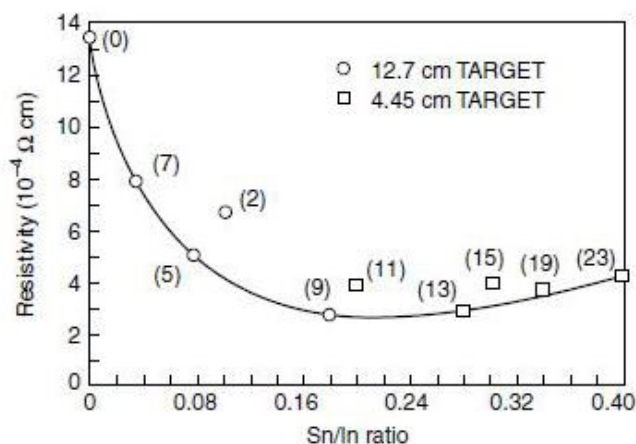


Рисунок 1.5 – Изменение сопротивления ИТО в зависимости от отношения атомов Sn/In (мол.%) [31]

Изменение сопротивления плёнок ИТО, при увеличении концентрации примесных атомов олова, ведет себя немонотонно. Авторы работы [31] отмечают, что минимальное удельное сопротивление плёнок ИТО было достигнуто при концентрации SnO_2 около 10 мол.% и составило $3 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}$. В работе [32] при такой же концентрации легирующей примеси было достигнуто значение $1,77 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Изложенные результаты можно объяснить, опираясь на модель примесного легирования плёнок ИТО и схематическую атомную структуру, приведенную на рисунке 1.6.

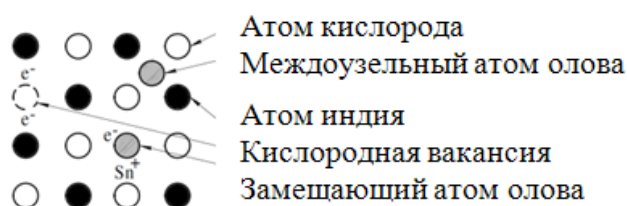


Рисунок 1.6 – Упрощенная структура плёнок ИТО

При легировании In_2O_3 атомами Sn^{4+} часть из них в решетке материала замещают атомы In^{3+} , становясь донорным центром. Каждый примесный атом Sn^{4+} увеличивает концентрацию электронов проводимости с одной стороны и вызывает рассеяние электронов с другой. Не все атомы Sn^{4+} становятся замещающими и занимают узлы кристаллической решётки. Некоторые из них, занимая междоузельные положение, становятся центрами рассеяния электронов проводимости, не внося вклада в увеличение проводимости. Дальнейшее увеличение концентрации междоузельных атомов Sn^{4+} приводит к возрастанию потерь, связанных с рассеянием электронов, что является причиной возрастания сопротивления при высоком отношении Sn/In .

Донорную электропроводность плёнок ИТО удобно рассмотреть на основе кластерной модели, представленной в [31]. Согласно данной модели, описанной в [31], кластер нейтрального дефекта состоит из двух замещающих катионов Sn^{4+} и одного междоузельного аниона O^{2-} . При высоком парциальном давлении кислорода при синтезе плёнок ИТО их проводимость может быть значительно ограничена образованием кластеров нейтральных дефектов. Однако, при низком парциальном давлении кислорода некоторые из этих кластеров разрушаются, в результате чего теряется междоузельный анион O^{2-} , что даёт два дополнительных электрона проводимости из активных примесных атомов Sn^{4+} на месте In^{3+} . Кластерная модель показывает, что вакансии кислорода дают основной вклад в проводимость плёнок ИТО при более низком парциальном давлении кислорода. Такой механизм образования носителей заряда впервые предложен в [33].

Наряду с концентрацией носителей заряда в пленках ИТО важным параметром, влияющим на электропроводность, является подвижность носителей. Механизмы рассеивания, влияющие на подвижность электронов в поликристаллических полупроводниках, представлены в [34] и имеют следующие виды:

- 1) Рассеивание носителей заряда на границах зёрен. Вследствие такого рассеяния вокруг границ зёрен образуется область пространственного заряда, в результате чего возникший потенциальный барьер рассеивает электроны,

пересекающих эту область, уменьшая их подвижность. Описанное рассеивание носителей заряда границами зёрен существенно сказывается при приближении размера зёрен к длине свободного пробега носителей [35].

2) Рассеивание на ионизированных атомах примеси, вызванное отклонением свободных носителей электростатическими полями, образующимися из-за намеренно введённой примеси, а также дефектами междоузлия и вакансии.

3) Рассеивание на акустических фононах, вызванное осцилляцией атомов около положения равновесия и препятствующее движению электронов.

4) Рассеивание на введенных электронейтральных, не активных атомах примеси.

Приведенные и описанные механизмы рассеивания независимы, и могут влиять на перенос носителей заряда одновременно. Стоит отметить, что рассеивание в пленках ИТО для концентрации носителей менее 10^{19} см^{-3} на границах зёрен является доминирующим. При концентрации носителей более 10^{19} см^{-3} рассеивание на заряженной примеси становится более значительным. Уменьшить подвижность может плохая кристалличность плёнок из-за увеличения количества точечных дефектов, границ зёрен и общего искажения решётки. Из этого следует вывод, что рассеивание на примесных атомах, а также взаимодействующие центры рассеивания существенно сказываются в вырожденных полупроводниках с высокой концентрацией электронов проводимости.

В связи с этим, для увеличения подвижности носителей заряда в плёнках ИТО необходимо улучшать их структурное совершенство.

1.1.2 Оптические свойства плёнок ИТО

Согласно теории Друде, вследствие взаимодействия компоненты электрического поля света со свободными электронами прозрачных проводящих оксидов существует взаимосвязь между оптическими и электрическими

свойствами материала. Типичные для плёнок ИТО спектры пропускания, отражения и поглощения представлены на рисунке 1.7 [36].

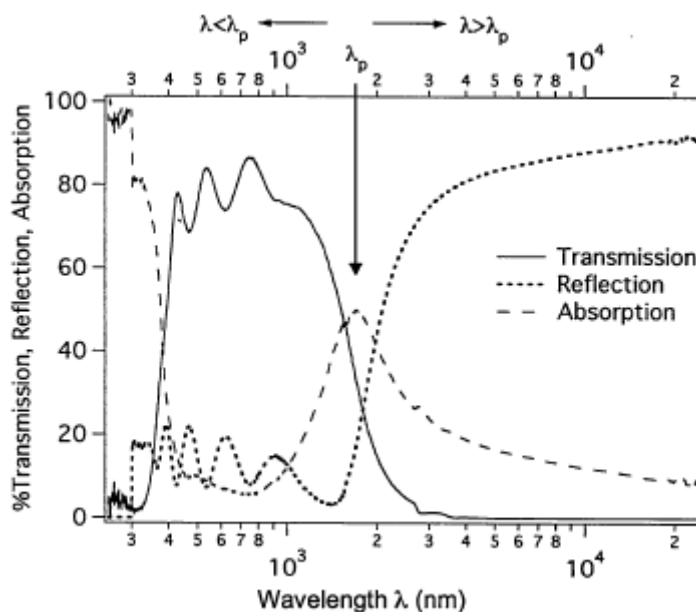


Рисунок 1.7 – Типичные спектры пропускания, отражения и поглощения плёнки ИТО [36]

Плёнки ИТО имеют высокую прозрачность в видимой области спектра пропускания (400 – 750 нм). Фотоны световой волны с длиной менее 350 нм обладают энергией, превышающей ширину запрещенной зоны ИТО, поэтому поглощаются при переходах. Этим обусловлено резкое уменьшение пропускания и увеличение отражения светового излучения в этом диапазоне длин волн.

Второе уменьшение пропускания и увеличение отражения светового излучения пленкой ИТО наблюдается с другой стороны спектра при длине волны более 1500 нм. Этот переход, соответствующий максимуму поглощения, связан с плазменной длиной волны (λ_p на рисунке 1.7), когда частота света совпадает с частотой осцилляций электронов в ИТО, что приводит к поглощению света. При $\lambda < \lambda_p$ волновая функция является осциллятором и свет может беспрепятственно проходить сквозь ИТО. Когда $\lambda > \lambda_p$ наблюдается отражение света.

Таким образом, на оптические свойства плёнок ИТО напрямую оказывают влияние концентрация электронов и их подвижность [31]. Значение концентрации электронов влияет на изменение коэффициента пропускания в коротковолновой и

длинноволновой областях спектра пропускания. С увеличением концентрации электронов обе эти границы обычно сдвигаются в коротковолновую область спектра.

Подвижность электронов проводимости в явном виде не влияет на плазменную длину волны или коротковолновую границу пропускания [31]. В результате этого достижение наиболее оптимальных значений высокой проводимости и широкой полосы пропускания возможно при высоком значении подвижности электронов и низким значении их концентрации.

1.2 Вакуумные методы осаждения плёнок ITO

Анализ имеющейся научно-технической литературы показывает, что, начиная с 1954 г. когда были получены плёнки ITO [30], обладающие высокой прозрачностью и хорошей электропроводностью, начались всесторонние исследования электрофизических свойств этого класса материала (на основе In_2O_3 , SnO_2 , позднее ZnO и др.). При этом, плёнки прозрачных проводящих оксидов синтезировали на стекле для применения в качестве прозрачных проводящих электродов. Исходя именно из этого применения для оптимизации электрофизических свойств плёнок прозрачных проводящих оксидов обычно используют некие критерии качества, обозначаемые как φ_{TC} . Чаще всего их рассчитывают по формуле (1.1) [37], реже по формуле (1.2) [38].

$$\varphi_{TC} = T^{10}/R_S, \quad (1.1)$$

где R_S – слоевое сопротивление,

T – коэффициент пропускания плёнки.

$$\varphi_{TC} = 1/\alpha\rho = -1/[R_S \cdot \ln(R+T)] \quad (1.2)$$

где R – коэффициент отражения,

ρ – удельное сопротивление,

α – коэффициент поглощения плёнки.

В видимом диапазоне поглощение плёнок прозрачных проводящих оксидов невелико, следовательно, применение подобных критериев качества привело фактически к соревнованию за удельное сопротивление. В таблице 1.1 автором [30] приведены некоторые наилучшие результаты, полученные при отработках технологий осаждения плёнок ИТО различными физическими и химическими методами на стеклянных подложках.

Таблица 1.1 – Значения удельного сопротивления плёнок ИТО, полученных различными методами [30].

Метод осаждения	$\rho, 10^{-4}$ Ом·см	Год
Реактивное испарение	0,7	1980
Реактивное электронно-лучевое испарение	0,44	1993
Плазменная технология электронно-лучевого испарения	2,6	1993
Магнетронное распыление	1,68	1983
----//----//----	1,79	2012
ВЧ распыление	0,95	2002
Импульсное лазерное осаждение	0,77	2000
----//----//----	1,79	2012
Осаждение из газовой фазы (CVD)	1,5	2003
Золь-гель метод	8	2002
Спрей пиролиз	5	1981
Пирозоль	1,6	2008

Сопоставив представленные результаты, можно утверждать, что плёнки ИТО, нанесенные вакуумными методами напыления, обладают минимальным удельным сопротивлением. Наиболее используемыми методами вакуумного напыления плёнок ИТО являются методы термического и электронно-лучевого испарения, а также ионно-плазменные методы распыления металлических и керамических мишеней.

Авторы работ [6, 39] проводят сравнение электрических и оптических свойств плёнок ИТО, полученных электронно-лучевым испарением и

магнетронным напылением. Они отмечают, что плёнки ИТО, полученные методом магнетронного распыления отличаются пониженным удельным сопротивлением вследствие более высоких значений концентрации и подвижности носителей. Кроме того, такие плёнки более плотные, не склонны к образованию кристаллитов нитевидной формы и имеют ровную внешнюю границу (рисунок 1.8).

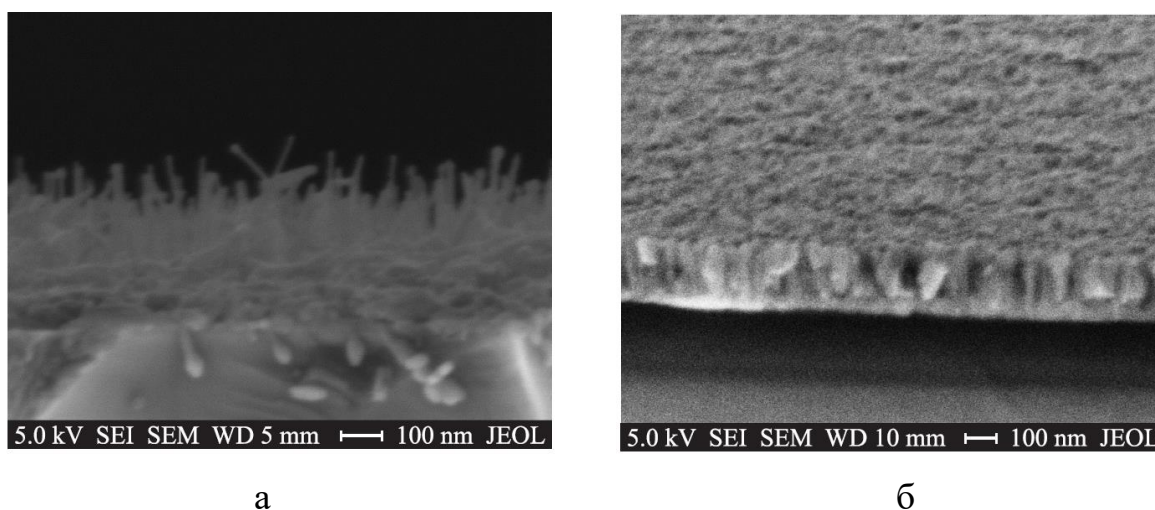


Рисунок 1.8 – РЭМ изображения плёнок ИТО, нанесенных разными методами:
а — электронно-лучевое испарение, б — магнетронное напыление [39]

Оценка авторами в работе [39] показателя преломления плёнки ИТО, нанесенной методом реактивного магнетронного напыления, при длине волны 420–450 нм дает значения в диапазоне от 2,06 до 2,11. Для плёнки, нанесенной методом электронно-лучевого испарения, в силу ее пористости, показатель преломления оказывается существенно ниже: от 1,34 до 1,36.

Таким образом с точки зрения получения наилучших электрофизических свойств плёнок ИТО особым преимуществом как метод нанесения плёнок обладает метод магнетронного распыления. Вследствие этого, в данной работе более детальное рассмотрение отводится методу магнетронного распыления, как более технологичному методу нанесения тонких плёнок сложных составов.

1.2.1 Синтез плёнок ИТО методом магнетронного распыления

Одним из наиболее распространенных методов синтеза плёнок ИТО является метод реактивного магнетронного распыления. Это обусловлено тем, что при варьировании различных технологических параметров (давление рабочего газа, состав рабочей атмосферы, ток газового разряда) данный метод позволяет управлять свойствами получаемых покрытий в довольно широком диапазоне. Кроме того, существует много разновидностей реализации процесса магнетронного распыления, такие как распыление мишеней при питании магнетронной распылительной системой постоянным током (*DC*), переменным током средних частот (*MF*) и переменным током высокой частоты (*RF*) [40].

Реактивное магнетронное распыления мишеней In/Sn на постоянном токе для получения плёнок ИТО имеет следующие преимущества: высокие скорости осаждения, управление электрофизическими свойствами плёнок и прецизионный контроль состава осаждённой плёнки. Физические свойства плёнок ИТО, напыленных данным методом, в основном зависят от параметров распыления, таких как парциальное давление кислорода в составе рабочей газовой смеси, температура подложки, рабочее давление и т.д. [41].

Осаждение плёнок химических соединений методом реактивного магнетронного распыления предполагает наличие реактивного газа в составе рабочей газовой атмосфере. Реакция взаимодействия распыляемых атомов мишени и реактивного газа может протекать на поверхности мишени, в зоне движения потока распылённых частиц, либо на поверхности подложки и осаждаемой плёнки [42].

Однако, для магнетронных распылительных систем на постоянном токе присут ряд следующих недостатков, ограничивающих применимость этого метода. Во-первых, возможно взаимодействие поверхности мишени с химически активными молекулами газа, в результате чего образуется диэлектрическая плёнка, влияющая на последующее распыление мишени. Во-вторых, адсорбция газов приводит к окислению и загрязнению поверхности мишени. Для устранения

этих недостатков при применении магнетронных распылительных систем на постоянном токе перед напылением производится предварительная тренировка мишени в плазме собственного разряда [42].

Высокочастотное распыление позволяет получать высококачественные плёнки путем распыления металлических мишеней, но и мишеней, выполненных из диэлектриков. На практике чаще всего используют частоту 13.56 Гц [43].

Для напыления прозрачных проводящих покрытий на основе оксидов металлов может использоваться метод магнетронного распыления металлической мишени с реактивными процессами или применяться керамические (проводящие или диэлектрические) мишени.

Исходя из опытных результатов поиска оптимального состава мишени для нанесения плёнок ИТО, в области малых значений концентраций легирующего окисла SnO_2 в мишени $\text{SnO}_2:\text{In}_2\text{O}_3$ (от 0 до 10%) наблюдается увеличение концентрации носителей заряда. Это явление объясняется тем, что Sn^{4+} является донором, и путем замещения In^{3+} в решетке In_2O_3 появляется дополнительный электрон, который соответственно увеличивает концентрацию свободных носителей заряда. Далее, в области от 10 до 50 % содержания SnO_2 в мишени $\text{SnO}_2:\text{In}_2\text{O}_3$, наблюдается монотонное уменьшение концентрации носителей заряда. Таким образом, было определено, что наиболее оптимальный состав магнетронной мишени для получения тонких плёнок ИТО: SnO_2 - 10%; In_2O_3 - 90% [44].

Не смотря на вполне определенный наиболее оптимальный состав распыляемой мишени, проблема управления электрофизическими свойствами плёнок ИТО, полученными магнетронным распылением, на настоящий момент является актуальной. К наиболее важным технологическим параметрам процесса реактивного магнетронного распыления относятся: общее давление газовой смеси при распылении, парциальное давление реактивного газа, режим распыления, температура подложки и ее свойства.

В работе [45] проведено сравнение плёнок, полученных реактивным распылением мишени, состоящей из сплава индия (90%) и олова (10%), в режиме

постоянного тока (режим DC) и в импульсном режиме со средней частотой 40 кГц (режим MF) в атмосферах воздуха (~21% кислорода) и газовой смеси аргона (80%) с кислородом (20%). Плёнки осаждали в течение 15 минут на подложки, температура которых составляла 20°C, 150°C и 200°C. Результаты экспериментов влияния условий нанесения плёнок ИТО на их характеристики приведены в таблице 1.2, где P_0 – остаточное давление в камере; P_P – рабочее давление; N – мощность тока на мишени; T_{II} – температура подложки; τ – время осаждения плёнки; h – толщина полученной плёнки.

Таблица 1.2 – Условия получения плёнок ИТО и их характеристики

Режим	P_0 , Па	P_P , Па	N , Вт	T_{II} , °C	τ , мин	h , нм	ρ , Ом/□
Ag + O ₂ режим MF	0,013	0,07	30	200	15	254	118
	0,013	0,07	30	150	15	250	6000
	0,013	0,07	30	20	15	234	> 4000000
Ag + O ₂ режим DC	0,013	0,07	30	200	15	250	————
воздух режим DC	0,013	0,2	20	200	15	130	23070
	0,013	0,2	20	150	15	138	> 4000000
	0,013	0,2	20	20	15	153	> 4000000

Из таблицы 1.2 видно, что режим работы магнетрона заметного влияния на скорость осаждения не оказывает, но существенно влияет состав рабочего газа: скорость осаждения в смеси Ag + O₂ практически вдвое выше, чем в воздухе. Проводя рентгеноструктурный анализ плёнок ИТО на установке ДРОН-4-07 и сравнивая полученные дифрактограммы плёнок, осажденных при разных температурах подложки, разных режимов работы магнетрона и в атмосферах разных газовых смесей с дифрактограммой коммерческого ИТО фирмы *Asahi U* (рисунок 1.9), коллектив А.И. Бажина сделал так же несколько выводов.

Во-первых, из рисунка 1.9а видно, что в режиме DC при комнатной температуре подложки в газовой среде воздуха на дифрактограмме наблюдается очень широкий диффузный горб в области углов $2\theta = 30 \div 50^\circ$. Это согласуется с данными работы [46], в которой показано, что диффузный горб вблизи $2\theta = 24^\circ$

обусловлен стеклянной подложкой, а вблизи $2\theta = 31^\circ$ – аморфной пленкой ИТО. Таким образом, можно утверждать, что на ненагретой стеклянной подложке в режиме *DC* в рабочей атмосфере воздуха формируются аморфные плёнки ИТО. С повышением температуры подложки до 150°C ширина диффузного горба уменьшается ($2\theta = 30 \div 45^\circ$), а высота несколько увеличивается, что может быть следствием структурных изменений в пленке, которая остается аморфной.

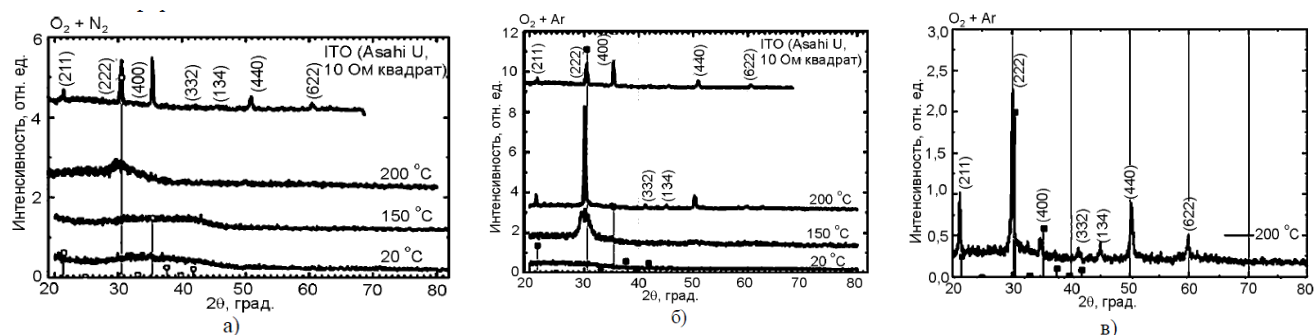


Рисунок 1.9 – Дифрактограммы плёнок ИТО, полученных в разных режимах и разных средах: а) в режиме *DC* в среде воздуха; б) в режиме *MF* в газовой среде $\text{Ar} + \text{O}_2$; в) в режиме *DC* в газовой среде $\text{Ar} + \text{O}_2$.

Во-вторых, дифрактограммы, приведенные на рисунке 1.9б, свидетельствуют о том, что в режиме *MF* в газовой смеси $\text{Ar} + \text{O}_2$ при комнатной температуре подложки осаждаются аморфные плёнки ИТО, как при такой же температуре в режиме *DC* в среде воздуха, что может быть следствием определяющего влияния температуры подложки. Кристаллические плёнки в режиме *MF* в газовой смеси $\text{Ar} + \text{O}_2$ начинают формироваться при более низкой температуре, равной 150°C , чем в среде воздуха в режиме *DC* (рисунок 1.9б). Как видно из рисунка 1.9б, повышение температуры подложки способствует повышению интенсивности дифракционных пиков и снижению их ширины, что характерно для кристаллизующихся плёнок. Из этого следует, что при температуре подложки 200°C , независимо от режима магнетронного распыления металлической мишени, содержащей 90% In + 10% Sn, в газовой среде $\text{Ar} + \text{O}_2$ и в

среде воздуха формируются поликристаллические плёнки ИТО, степень совершенства которых зависит от режима работы магнетрона.

Таким образом, установлено, что в газовых средах воздуха и смеси $\text{Ar} + \text{O}_2$ независимо от режима реактивного магнетронного распыления сплава $90\%\text{In} + 10\%\text{Sn}$ на стеклянных подложках при комнатной температуре формируются аморфные плёнки, которые обладают высокой ($> 80\%$) прозрачностью и высоким поверхностным сопротивлением ($> 4 \text{ МОм}/\square$). На стеклянных подложках, нагретых до температуры 200°C , формируются кристаллические плёнки ИТО с преимущественной ориентацией кристаллитов $\langle 111 \rangle$. Кристаллические плёнки, полученные в атмосфере воздуха в режиме *DC* при 200°C , сохраняют высокую прозрачность, а их сопротивление существенно снижается ($23 \text{ кОм}/\square$) по сравнению с аморфными. Наименьшим сопротивлением ($118 \text{ Ом}/\square$) обладают кристаллические плёнки ИТО, полученные в атмосфере $\text{Ar} + \text{O}_2$ в режиме *MF*, однако их прозрачность снижена до 40% . Улучшение электрических свойств плёнок, осажденных на нагретые до 200°C подложки, может быть связано с повышением подвижности носителей заряда, обусловленным как релаксацией напряжений в пленках и формированием более совершенной текстуры, так и увеличением числа ионов олова в решетке In_2O_3 в электрически активном состоянии. Изменения оптических свойств плёнок ИТО с изменением температуры стеклянной подложки связаны с эффектом Бурштейна-Мосса. Значения ширины запрещенной зоны зависят от структурного совершенства плёнок ИТО и лежат в интервале $3,74 - 3,94 \text{ эВ}$: чем меньше структурное совершенство плёнок, тем больше ширина запрещенной зоны.

Интересные результаты исследований структурных свойств плёнок ИТО методом рентгеновской дифракции приведены Д.А. Зуевым и другими авторами в [49] (рисунок 1.10).

При исследовании влияния температуры подложки на физические свойства плёнок ИТО применялась мишень с $5 \text{ ат } \%$ содержанием олова. Осаждение осуществлялось при парциальном давлении кислорода 10 мТорр . На рисунке 1.10а показано, что при температурах осаждения ниже 200°C плёнки ИТО аморфны. При

температурах подложки более 200°C в дифрактограммах появляется дифракционный пик, соответствующий узлу решетки In_2O_3 (222), интенсивность которого возрастает. Авторы отмечают, что с увеличением температуры подложки ширина дифракционного пика на его полувысоте снижается, что связано со снижением количества структурных дефектов плёнки и увеличением размеров зерен кристаллитов [50]. В ходе изучения влияния парциального давления буферного газа на структурные параметры плёнок ИТО использовалась также мишень с 5% атомарным содержанием олова, а температура подложки составляла 300°C . В случае бескислородного осаждения (рисунок 1.10 б) плёнки ИТО аморфны, однако даже небольшое добавление кислорода в процессе роста приводит к появлению дифракционного пика (222). При давлении кислорода 10 мТорр начинает проявляться дифракционный пик вблизи $2\theta = 29,8^{\circ}$, соответствующий фазе SnO. При дальнейшем увеличении давления буферного газа интенсивность дифракционного пика, соответствующего фазе SnO, значительно возрастает.

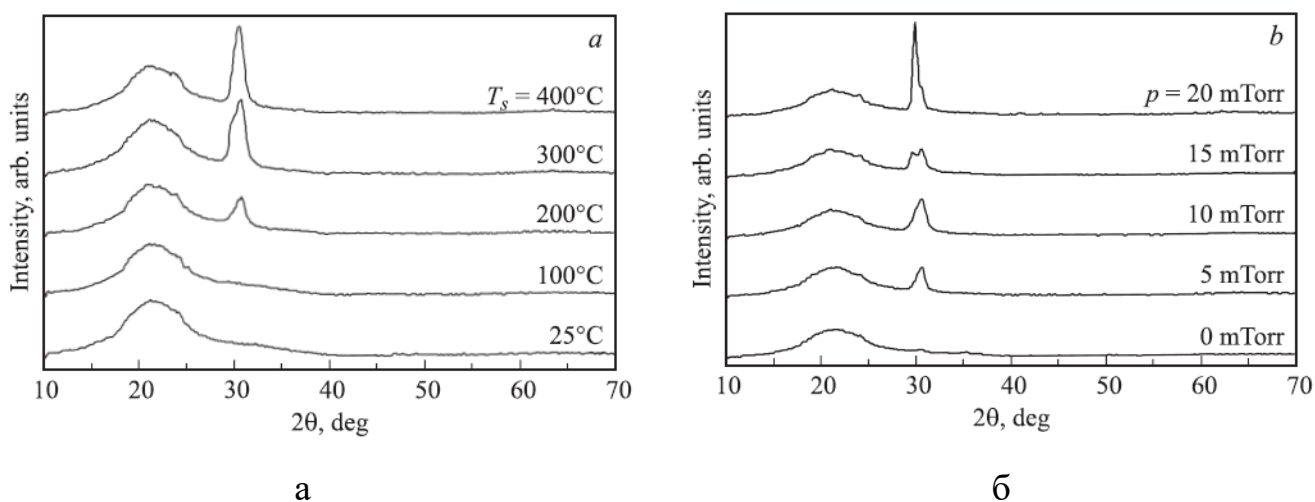


Рисунок 1.10 – Нормированные дифрактограммы плёнок ИТО как функции температуры подложки T_s (а) и давления кислорода p (б)

Методом АСМ было установлено, что шероховатость плёнок, напыленных на подложки при комнатной температуре, составляла 5 нм и уменьшалась с температуры подложки. Минимальная шероховатость 2 нм достигалась при

температурах более 300°C. Изменение концентрации легирующей примеси и давления кислорода при температуре осаждения 300°C существенного влияния на шероховатость плёнок не оказывало. Из этого можно сделать вывод, что конечное формирование кристаллической структуры плёнок ИТО происходит при температуре подложки свыше 300°C.

1.2.2 Воздействие плазмы магнетронного разряда на подложку и растущую пленку

Основной особенностью магнетронного газового разряда, выделяющего его из других разновидностей разрядов ионно-плазменных систем распыления, является локализация плазмы у поверхности мишени (катода) [51]. Такой результат достигается за счет движения электронов в скрещенных электрических и магнитных полях. Величина напряженности магнитного поля у поверхности мишени составляет приблизительно 50-200 мТ. Электроны, попадающие в область скрещенных электрических и магнитных полей, движутся по траектории называемой циклоида, что приводит к очень высокой эффективности ионизации атомов рабочего газа. Это дает возможность поддержания магнетронного газового разряда при низких давлениях ($<10^{-2}$ Па) и более высоких плотностях тока, чем в обычном тлеющем разряде.

Упрощенная схема МРС планарного типа с круглым катодом представлена на рисунке 1.11 (а). Магнетронный разряд зажигается между катодом и анодом, которым обычно являются заземленные стенки вакуумной камеры. Питание разряда осуществляется от источника постоянного либо импульсного напряжения. Образующиеся в разряде ионы ускоряются в области катодного падения потенциала и бомбардируют катод из напыляемого материала, в результате чего происходит распыление его поверхности и формирование потока распыленных атомов в сторону подложки. Электроны, эмитируемые с мишени под действием бомбардировки, захватываются магнитным полем и совершают сложное циклоидальное движение по замкнутым траекториям в скрещенных

электрическом и магнитном полях. Двигаясь в магнитной ловушке у поверхности катода, электрон успевает многократно ионизовать атомы рабочего газа, прежде чем потеряет большую часть энергии и достигнет анода.

Большая часть энергии электрона используется на ионизацию и возбуждение, что значительно увеличивает эффективность процесса ионизации и приводит к росту концентрации положительных ионов у поверхности мишени. За счет локализации плазмы, у поверхности катода достигается высокая плотность ионного тока (на два порядка выше, чем в обычных диодных системах распыления) и большая удельная мощность, рассеиваемая на мишени. Это обуславливает увеличение интенсивности ионной бомбардировки мишени и значительный рост скорости распыления.

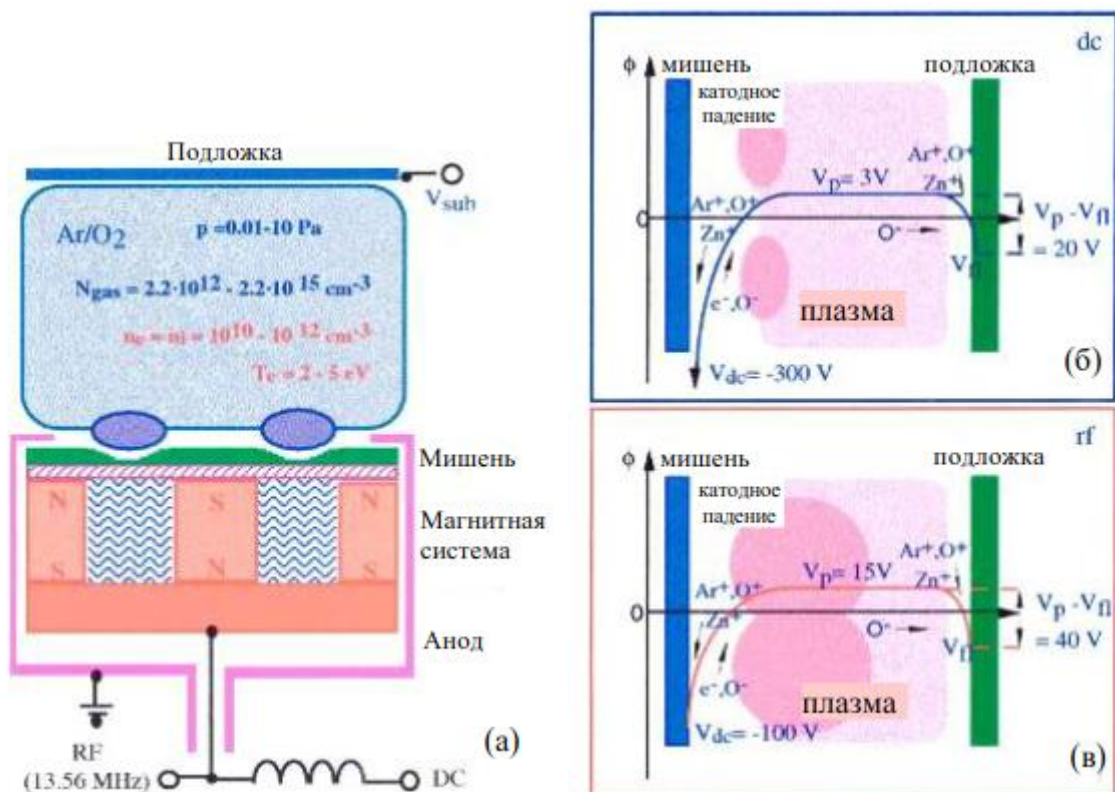


Рисунок 1.11 – Упрощенная схема магнетронного разряда (а), распределение потенциала плазмы в магнетронном разряде на постоянном токе (б) и распределение потенциала плазмы в ВЧ магнетронном разряде (в) [52].

На рисунок 1.11 (б) и (в) приведены распределения потенциала плазмы для

постоянного и высокочастотного магнетронного разряда соответственно. Распределение потенциала в плазме, поддерживаемой постоянным и высокочастотным разрядами отличается вследствие различных механизмов ионизации. Разрядное напряжение в высокочастотном распылении намного ниже, чем при распылении на постоянном токе при той же средней мощности. Это и приводит к различию протекающих процессов на поверхности мишени и в плазменном объеме при различных способах питания магнетрона [53].

Магнетронный газовый разряд при питании постоянным током поддерживается за счет эмиссии вторичных электронов с катода под действием ионной бомбардировки. Поэтому, для поддержания такого разряда необходимы большие напряжения между катодом и анодом, т.к. электронная эмиссия увеличивается почти линейно с увеличением энергии ионов [54]. С другой стороны, высокочастотная плазма поддерживается в первую очередь за счет ионизации атомов рабочего газа электронами, которые выполняют колебательные движения в плазменном объеме с частотой 13,56 МГц, в то время как ионы нет, вследствие большой массы. Этот вид возбуждения является более эффективным по сравнению с ионизацией вторичными электронами и возможен при более низких напряжениях питания. Однако, удержание электронов в магнитной ловушке не столь эффективно как при разряде на постоянном токе. Связано это с тем, что во время положительного полупериода анодом является мишень, поэтому плотность плазмы возле подложки при высокочастотном разряде существенно выше.

Распределение потенциала (рисунок 1.11 (б) и (в)) показывает, что положительные ионы ускоряются в катодном падении, приводя к распылению мишени. При этом, электроны и отрицательные ионы двигаются от мишени к подложке.

Таким образом, вместе с отраженными нейтральными атомами рабочего газа энергичные отрицательные ионы могут достигать подложки и влиять на характеристики плёнок. В случае высокочастотного разряда область плотной плазмы распространяется к подложке [55], что усиливает ионную бомбардировку

ее поверхности и растущей пленки (рисунок 1.11 б).

В связи с тем, что такая бомбардировка высокоэнергетичными заряженными частицами подложки и растущей на ней плёнки в некоторых случаях может являться критичной и недопустимой, то ниже рассмотрены вопросы влияния радиационного воздействия плазмы магнетронного разряда на изменение характеристик плёнок и подложек.

Влияние радиационного воздействия плазмы магнетронного разряда на электрофизические свойства напыляемых плёнок

Электронно-ионная бомбардировка поверхности тонких плёнок в процессе их конденсации и роста в большинстве случаев позволяет управлять их структурой и стехиометрией [43]. Наиболее существенно электронно-ионная бомбардировка сказывается на стадии образования зародышей плёнки вследствие релаксации напряжений в области бомбардировки и перестройки кристаллической структуры. Одновременно на поверхности образуются точечные дефекты, являющиеся центрами адсорбции. В процессе конденсации и роста плёнки важную роль играет подвижность адатомов на ее поверхности, которая возрастает при низкоэнергетической бомбардировке плёнки заряженными частицами. С образованием дефектов при электронно-ионной бомбардировке растущей плёнки одновременно идёт и процесс их рекомбинации – отжиг – снижающий их концентрацию. В результате протекания этих процессов устанавливается равновесное количество центров зародышеобразования, на количество которых несомненно влияют параметры электронно-ионной бомбардировки [43]. Таким образом низкоэнергетическое облучение обеспечивает более упорядоченный рост плёнок, способствует повышению их плотности и обеспечивает более четкие границы раздела слоёв [56].

Электронно-ионная бомбардировка плёнок также влияет и на морфологию их поверхности [60]. Исследования, проведенные автором в [60], показали, что морфология растущей плёнки значительно меняется при изменении температуры подложки, тока и энергии заряженных частиц, имеет тенденцию к образованию кристаллической фазы при больших скоростях осаждения плёнок и более

меньших температурах подложки.

Влияние радиационного воздействия плазмы магнетронного разряда на гетероэпитаксиальные подложки

В настоящее время о влиянии электронно-ионной бомбардировки в процессе напыления тонких плёнок ионно-плазменными методами на электрические и рекомбинационные свойства гетероструктур пониженной размерности, в том числе на основе полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$ известно мало. Практически нет сведений о методах оценки и механизмов образования радиационных дефектов в гетероэпитаксиальных структурах и МДП-структурах на их основе.

При бомбардировке поверхности твердого тела ускоренными ионами и высокоэнергетичными электронами происходит ряд взаимосвязанных процессов, приводящих к протеканию различного рода процессов (рисунок 1.12) [61].

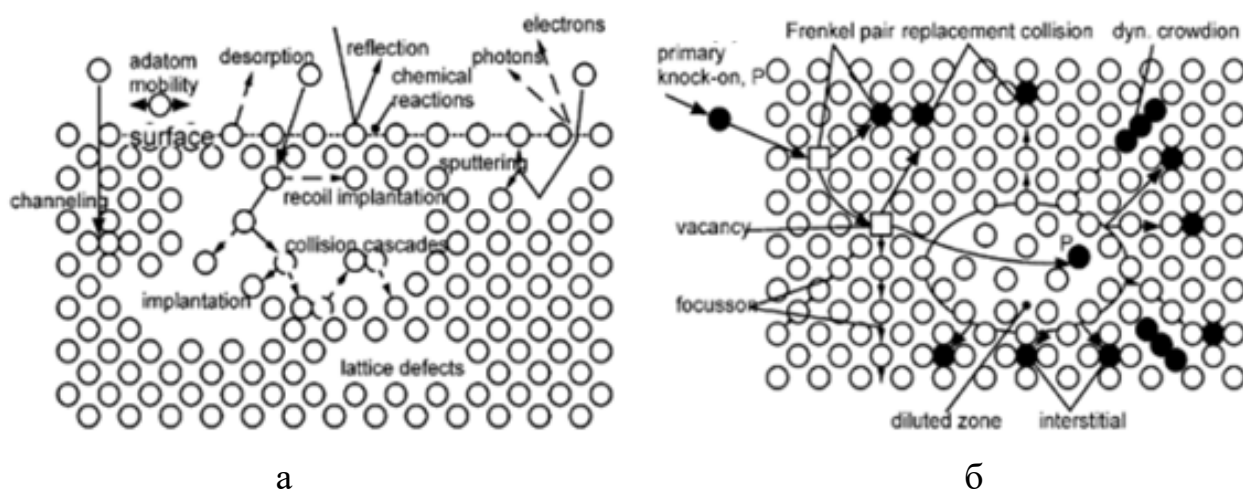


Рисунок 1.12 – Схема воздействия электронно-ионной бомбардировки на структуру растущей плёнки (а) и схематическое изображение возможных дефектов кристаллической решетки образованных взаимодействием энергетических частиц непосредственно с атомами подложки (б)

Бомбардирующие твердое тело положительные ионы, отрицательные электроны или быстрые атомы могут испытать упругое или неупругое рассеяние, адсорбироваться на поверхности или проникнуть вглубь, перезарядиться. Внедрившийся в твердое тело ион теряет заряд, в результате многократных

столкновений с атомами теряет энергию и имплантируется в кристаллическую решетку. Одновременно с этим часть поверхностных атомов твердого тела, вследствие передачи им энергии, распыляется. При ионной бомбардировке наблюдается также электромагнитное излучение и эмиссия вторичных электронов.

Движение всех частиц в твердом теле в большинстве обсуждаемых процессах рассматривается до тех пор, пока их энергия больше энергии смещения атома из узла кристаллической решетки и образования радиационных дефектов. Возникающие радиационные дефекты проявляют себя в полупроводниках как центры рекомбинации, изменяя время жизни неосновных носителей заряда, а также как центры захвата, снижая концентрацию основных носителей, и как центры рассеяния, уменьшая подвижность [62].

Гетероструктуры на основе полупроводниковых соединений $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$, благодаря сильной химической связи входящих в их состав соединений, довольно устойчивы к термическому, механическому и другим видам разрушения. Тем не менее, деградация активной области гетероструктур на основе полупроводниковых соединений $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$ считается одной из основных причин выхода из строя приборов микро- и наноэлектроники. Примерами этого могут являться работы коллективов, связанных с разработкой гетероструктурной СВЧ-электроники и технологией производства светодиодных кристаллов. В работе [63] Л.Э. Великовским и др. описываются особенности разработанной ими технологии изготовления СВЧ полевых транзисторов с барьером Шоттки. Авторами отмечается, что при формировании подзатворных углублений РИТ вносимые в используемую гетероструктуру $n-i\text{-GaN}$ радиационные дефекты приводят к нежелательному увеличению токов утечки затвора. При этом, никаких других методов более глубокого анализа авторами не использовалось, как отмечают сами авторы, по причине их недоступности.

Нанесение р-контактов методом магнетронного распыления на светодиодные структуры AlGaInN также приводит к ее деградации. Так в работах коллектива из ФТИ им. А.Ф. Иоффе [6, 39], длительное время осуществляющего

исследования в данной области, отмечается, что формирование омического контакта к *p*-GaN методом магнетронного распыления создает дефекты кристаллической структуры в подложке, существенно повышающие контактное сопротивление.

В то же время, примеры успешного применения магнетронного напыления для формирования тонкопленочных слоев на поверхности гетероструктур зарубежными производственными компаниями не публикуются видимо, рассматривая эти данные в качестве ноу-хау.

При этом, все опубликованные работы разного времени различных зарубежных коллективов по данной тематике только подтверждают возникающие проблемы деградации гетероструктур при электронно-ионной бомбардировке заряженными частицами, возникающей в результате операций напыления и травления. В работе [64] подробно рассматривалось влияние индуктивно-связанной плазмы на электрические характеристики слоя *p*-GaN и наблюдалось изменение типа проводимости в приповерхностных областях материала. По всей видимости, авторы работ [65] и [66] также столкнулись с похожими проблемами при напылении контакта ITO к *p*-GaN магнетронным методом.

Вероятные причины этому предлагаются в работе [67], где авторами отмечается, что в результате ионной бомбардировки поверхность GaN сильно обедняется атомами азота, фасетируется, а электронные свойства такой поверхности значительно деградируют [68]. Следовательно, как ионная бомбардировка, так и высокотемпературный прогрев вызывают появление большого количества дефектов в приповерхностной области полупроводника, что ограничивает использование этих методов при создании высокоэффективных приборов нанoeлектроники [69].

Таким образом, большинство работ различных коллективов сообщают о негативном влиянии электронно-ионной бомбардировки на характеристики гетероструктур полупроводниковых приборов.

1.2.3 Методы отвода заряженных частиц от подложки и конденсирующейся на ней плёнки в процессе магнетронного распыления

Хотя ионное распыление представляет собой по существу низкотемпературный процесс, побочным его результатом является выделение значительных количеств энергии, которое может привести к существенному и, как правило, нежелательному повышению температуры в распылительной системе, если, конечно, не будут приняты меры по эффективному отводу избыточной тепловой энергии. На выброс распыляемого материала и вторичных электронов идет менее 1% всей прикладываемой мощности [61]. Около 75% остальной, непроизводительной мощности, выделяется в виде тепла на катоде при бомбардировке его ионами и быстрыми нейтральными атомами. Кроме того, мощность передается вторичным электронам, когда они ускоряются в катодном темном пространстве, а затем переходит в тепло при соударениях этих электронов с подложкой. Если же на подложку подать достаточно большой отрицательный потенциал, чтобы отталкивать быстрые вторичные электроны, подложка разогреется еще сильнее, поскольку будет в этом случае притягивать соответствующее число положительно заряженных ионов. Таким образом, в распылительных системах, работающих при низком давлении газа, особенно когда подложка располагается очень близко к катоду, количества энергии, рассеиваемой на единице площади подложки и катода, могут быть сравнимыми.

Несмотря на остроту вопроса негативного влияния плазмы магнетронного разряда на поверхность подложки и растущей плёнки (в частности в [6, 11] авторами отмечено, что при напылении плёнок ИТО на поверхность *p*-области GaN-гетероструктур методом магнетронного распыления происходит деградация гетероструктуры), результаты проводимых работ в направлении уменьшения электронно-ионной бомбардировки практически отсутствуют [25]. По этой причине в данном разделе приводятся лишь общие конструкторские решения в области магнетронных распылительных систем, направленные на уменьшение

плотности плазмы газового разряда у поверхности подложки.

Одним из наиболее простых методов отвода электронов с высокой энергией от подложки и конденсирующейся на ее поверхности плёнки является подача на подложку обратно смещенного относительно анода потенциала. Однако, как было сказано выше при этом возрастает ускоряющее поле для ионов, что, при определенном значении приложенного потенциала, является причиной еще более пагубной для гетероструктурной подложки ионной бомбардировки. Тем не менее в некоторых случаях ионная бомбардировка растущей плёнки положительно влияет на кинетику зародышеобразование, механизм роста и, как следствие ее свойства. В [59], авторами при исследовании влияния низкоэнергетичной ионной стимуляции на плотность и кристаллическую структуру тонких плёнок Ni показано, что при небольших значениях смещения плёнки формируются с большей плотностью и упорядочением кристаллической решетки, чем без смещения. При больших значениях смещения ионная бомбардировка приводит к образованию различного рода дефектов в пленках Ni, а, следовательно, к уменьшению плотности и снижению кристаллического упорядочения плёнок.

С целью уменьшения количества заряженных частиц, бомбардирующих поверхность подложки, может использоваться эффект «электрического зеркала» в сочетании с магнитным удержанием плазмы и вторичных катодных электронов. Для реализации этого эффекта необходимо, чтобы МРС содержала, как минимум, два катода - отражателя электронов, а силовые линии магнитного поля были направлены от поверхности одного катода к другому.

Эффект «электрического зеркала» заключается в следующем. Электроны, эмитированные катодом и находящиеся в межэлектродном промежутке, ускоряются электрическим полем в прикатодном слое положительного пространственного заряда в сторону второго катода (или противоположной поверхности того же катода). Пройдя точку пространства с максимальным потенциалом, электроны начинают тормозиться, и в точке с потенциалом, соответствующим их энергии, поворачиваются обратно. Затем электроны снова разгоняются, но в противоположном направлении, и опять тормозятся. Подобный

процесс повторяется многократно, а характер движения электронов напоминает процесс многократного отражения света от зеркал.

Осциллирующие электроны не могут сразу попасть на анод, расположенный сбоку от магнитных силовых линий, так как они удерживаются на траектории осцилляций магнитным полем (силовые линии электрического поля должны быть параллельны силовым линиям магнитного поля, а напряжённость магнитного поля должна быть достаточной для того, чтобы ларморовский радиус электронов был намного меньше размеров системы). Электроны перемещаются к аноду поперек магнитных силовых линий поля только после столкновений с молекулами газа и перескока на новую траекторию. Реальные траектории электронов носят сложный колебательно-вращательный характер, в результате чего существенно удлиняется путь электронов в межэлектродном промежутке, и они эффективно ионизируют газ.

Примером такой системы может служить ячейка Пеннинга, где электроны осциллируют вдоль магнитного поля между плоскими катодами. МРС на основе ячейки Пеннинга пригодны для распыления магнитных материалов, поскольку выполнение катода-мишени из таких материалов не приводит к шунтированию им магнитного поля. В этом случае катоды ячейки служат полюсными наконечниками. В планарных МРС с туннелеобразным полем такое шунтирование имеет место, так как магнитные силовые линии должны дважды пересечь тело мишени и идти параллельно её поверхности. К таким системам относятся МРС типа «электрическое зеркало» с мишенями, обращенными друг к другу [69]. На рисунке 1.13 приведен вариант подобной системы, в которой мишени размещены на разнородных полюсах магнитной системы, анодом служат стенки камеры. В этой системе вторичные катодные электроны осциллируют вдоль осевого магнитного поля между катодами, т.е. их поверхность служит как бы электрическим зеркалом для электронов. Электроны одновременно движутся по циклоидальным траекториям в радиальном направлении к стенкам. Они проходят большой путь в межэлектродном пространстве, и в результате эффективно используется их энергия, полученная в прикатодном слое, для

ионизации газа. Магнитные силовые линии ограничивают радиальную диффузию электронов и плазмы в целом и обеспечивают тем самым магнитную изоляцию подложки. Отражённые от катода ионы (в виде нейтральных атомов) и ускоренные отрицательные ионы попадают главным образом на противоположную мишень, а не на подложку. Очевидно, что процессы в МРС подобного типа и в классической ячейке Пеннинга во многом аналогичны.

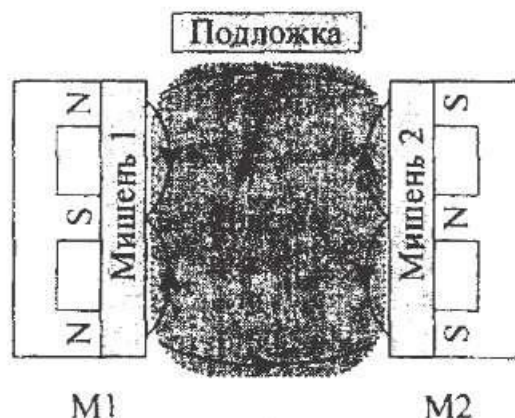


Рисунок 1.13 – МРС с двумя мишенями, обращенными друг к другу

В [69] предложены конфигурации электродов, напоминающие ячейку Пеннинга, но у которой один из плоских катодов заменён цилиндрическим. Здесь «электрическое зеркало» образовано двумя катодами, которыми служат две мишени - плоская и цилиндрическая; поверхность катодов пересекают силовые линии магнитного поля внешнего соленоида. Между катодами расположен анод, поверхность которого практически параллельна силовым линиям поля соленоида.

«Электрическое зеркало» для вторичных катодных электронов может быть создано с помощью компланарных (расположенных в одной плоскости) катодов-мишеней (дискового и кольцевого), если между ними поместить кольцевой анод, а сами катоды расположить на полюсах магнитной системы. При этом анод не должен пересекать магнитные силовые линии, имеющие дугообразную форму. В этой МРС электроны также осциллируют между плоскими катодами вдоль силовых линий магнитного поля, не попадая на анод.

Для управления потоком заряженных частиц к подложке может применяться и так называемое «магнитное смещение». За подложкой помещают

дополнительную магнитную систему, силовые линии которой совпадают с полем магнетрона и поток плазмы как бы фокусируется у подложки. При этом возрастают плавающий потенциал и ионный ток на подложку. При противоположном направлении поля происходит расфокусировка плазмы, снижается плавающий потенциал и ионный поток. Таким образом, магнитное смещение позволяет управлять процессом напыления, не меняя режима работы магнетрона.

1.2.4 Синтез плёнок ИТО методом электронно-лучевого испарения

В связи с тем, что магнетронное распыление создает дефекты кристаллической структуры в подложке, оно является неприемлемым при напылении тонких плёнок на поверхность гетероэпитаксиальных структур пониженной размерности [11, 66]. Напротив, формирование тонких плёнок ИТО на поверхности гетероэпитаксиальных структур электронно-лучевым испарением, не способствует ухудшению параметров последних, но имеют низкую прозрачность и высокое удельное сопротивление [11, 66, 70]. Низкая прозрачность плёнок ИТО напыленных электронно-лучевым испарением на подложки комнатной температуры связана с двумя факторами [11, 66, 70, 72, 73]. Во-первых, с их аморфной структурой, в которой образуется поликристаллические фазы после отжига [11]. Во-вторых, в работах [70, 74 - 77] отмечается, что низкая прозрачность плёнок ИТО после их нанесения электронно-лучевым испарением связана и с дефицитом кислорода в пленке из-за разложения оксидов In_2O_3 и SnO_2 при их испарении на субоксиды и кислород с образованием частиц металлического индия [70, 74].

Компенсировать недостаток кислорода при напылении плёнок ИТО методом электронно-лучевого испарения различные коллективы пытаются с помощью последующего отжига плёнок в среде, содержащей кислород или производят напуск кислорода в камеру в процессе напыления [75 - 80]. Однако оптимальные условия (температура, атмосфера, продолжительность) таких технологических

подходов не однозначны. Например, в работах [75, 80] авторы использовали отжиг напыленных плёнок ИТО в среде азота, а в работах [71, 76 - 79] в среде кислорода или воздуха. В работах [80, 81] применяли быстрый термический отжиг (несколько минут) при высоких температурах 550 – 600°C, а в работах [71, 73, 76 - 79] производимый отжиг составлял десятки минут при температурах 200 - 350°C.

Такие противоречивые результаты указывают на довольно неоднозначную зависимость параметров тонких плёнок ИТО, полученных методом электронно-лучевого испарения, от технологических режимов напыления.

Выводы к главе 1 и формулировка цели диссертационной работы

Сочетание оптических и электрических характеристик плёнок ИТО делают их необходимым и перспективным материалом для изготовления омических контактов приборов оптоэлектроники и радиофотоники. Основная часть научных работ исследовательских коллективов посвящена разработке технологии синтеза плёнок ИТО. Данных по исследованию электрофизических свойств, механизмов их электропроводности и ее природе практически не приводится. Наиболее приемлемым методом их синтеза является магнетронное распыление металлической мишени In/Sn в кислородосодержащей среде. Однако, в большинстве случаев, данный метод не применим для нанесения тонких плёнок на поверхность гетероэпитаксиальных полупроводниковых структур пониженной размерности, так как радиационное воздействие газоразрядной плазмы приводит к деградации их свойств. При этом, многими авторами отмечается, что на свойства плёнок ИТО радиационное и термическое воздействие газоразрядной плазмы наоборот влияет благоприятно.

В связи с этим цель данной работы заключалась в разработке физико-химических основ технологии получения тонких низкоомных прозрачных плёнок ИТО методом магнетронного распыления при сниженном радиационно-термическом воздействии на подложку, исследование свойств пленок ИТО и

формирование прозрачных омических контактов к изделиям гетероструктурной оптоэлектроники.

ГЛАВА 2. Технология изготовления образцов.

Структура и свойства плёнок ITO

Как отмечается многими исследовательскими коллективами, электрические и оптические свойства тонких плёнок ITO значительно зависят от технологии их формирования. Наименьшее полученное исследовательскими коллективами значение удельного сопротивления и обладающее высокой воспроизводимостью, составляет не менее 10^{-5} Ом·см. Таким образом, отработка технологии напыления тонких плёнок ITO с воспроизводимым значением удельного сопротивления ниже 10^{-5} Ом·см является важной задачей данного исследования.

В данной главе приводятся описания технологического, измерительного и аналитического оборудования, результаты разработки технологии напыления низкоомных плёнок ITO и исследования их электрофизических свойств.

Основные результаты проведенных исследований были опубликованы в работах [82-98].

2.1 Технологическое, измерительное и аналитическое оборудование.

Методики исследований свойств плёнок ITO

Разработка технологии напыления низкоомных плёнок ITO и непосредственное изготовления экспериментальных образцов производилось на технологическом оборудовании на базе вакуумной напылительной установки магнетронного распыления Kurt J. Lesker [99]. Вакуумная система установки Kurt J. Lesker состоит из механического спирального насоса Fossa FO-0015 и высоковакуумного турбомолекулярного насоса Shimadzu TMP-803, обеспечивающего скорость откачки 700 л/с и предельное остаточное давление $2,5 \cdot 10^{-4}$ Па. В качестве рабочих газов использовались аргон и кислород. Скорость их подачи в рабочую камеру регулировалась путем применения регуляторов расхода газа РРГ-12. Магнетронная распылительная система состояла из планарного DC магнетрона с круглым охлаждаемым водой катодом и источника

питания магнетронной распылительной системы APEL-M-PDC (Россия).

Толщины исследуемых плёнок ITO измерялись с помощью интерференционного микроскопа МИИ-4М (Россия). Эксперименты по исследованию оптических характеристик плёнок ITO проводились с использованием УФ-спектрометра USB2000 (США) и спектрофотометра Shimadzu UV – 3600 plus (Япония). Рентгенофазовый анализ проводился с использованием рентгеновского дифрактометра ARL X'TRA (Швейцария) с полупроводниковым Si (Li) Пельтье-детектором. Структура поверхности исследовалась с помощью растрового электронного микроскопа Hitachi TM-1000 (Япония).

2.1.1 Методика измерения поверхностного сопротивления тонких плёнок

Доминирующим критерием качества для прозрачных проводящих плёнок ITO является их удельное сопротивление. Для измерения поверхностного сопротивления образцов плёнок ITO в данной работе использовался четырехзондовый метод [100].

Этот метод не требует знания величины площади сечения образца и может применяться для измерений удельного сопротивления на образцах любой формы, имеющих одну плоскую поверхность.

Сущность метода заключается в следующем. На плоскую поверхность образца, размеры которого много больше расстояния между зондами, опускают четыре зонда (рисунок 2.1 а). Через крайние зонды 1 и 4 пропускают ток I , между внутренними зондами 2 и 3 измеряют падение напряжения U .

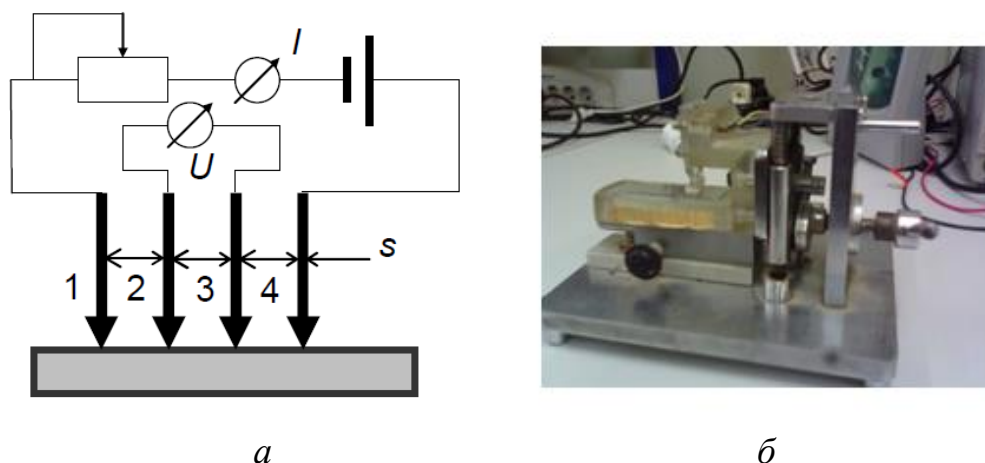


Рисунок 2.1 – Схема измерения поверхностного сопротивления четырехзондовым методом (а) и разработанный столик для проведения измерений (б)

Для полученных плёнок удельное поверхностное сопротивление рассчитывалось по формуле (2.1) и выражалось в Ом/□ [100].

$$\rho = \frac{U}{I} \cdot \frac{\pi}{\ln 2} \approx 4,53 \cdot \frac{U}{I}. \quad (2.1)$$

Протекающий по крайним зондам 1 и 4 ток и регистрируемое между внутренними зондами 2 и 3 напряжение измерялись мультиметрами DIGITAL DT-830В. Применение мультиметров позволяет измерять поверхностное сопротивление не более $4,53 \cdot 10^3$ Ом/□. При измерении образцов большего сопротивления для измерения тока, протекающего по зондам, применялся микроамперметр Ф195. Микроамперметр Ф195 имеет класс точности 1.0 и предназначен для измерения и индикации малых постоянных токов от 50 нА до 100 мкА, что позволяет увеличить предел измерения поверхностного сопротивления до 20 МОм/□. На рисунке 2.1 б представлен разработанный и изготовленный столик для проведения четырехзондовых измерений.

2.1.2 Методика измерения концентрации и подвижности носителей заряда

Концентрация и подвижность основных носителей заряда определялась при помощи эффекта Холла – возникновения поперечной разности потенциалов в

образцах (U_H) при помещении исследуемого образца плёнки ИТО, через который проходит постоянный ток, в магнитное поле (рисунок 2.2) [101].

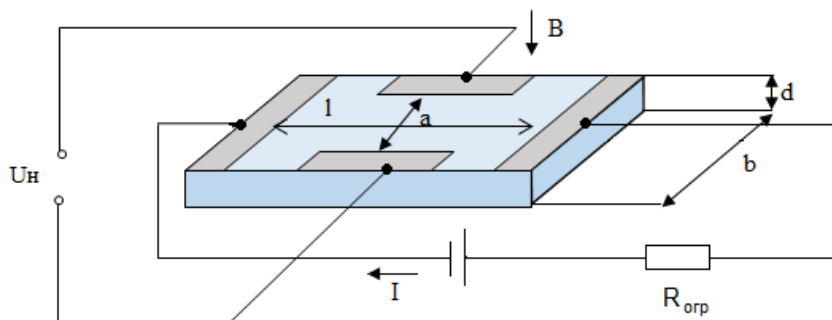


Рисунок 2.2 – Геометрия образцов для проведения измерения концентрации и подвижности носителей заряда

Для обеспечения протекания тока через образец два противоположных сформированных контакта подключались к источнику постоянного тока Power Supply NY3003 через последовательно включенный токоограничивающий резистор $R_{огр}$ сопротивлением 1,2 кОм. ЭДС Холла U_H измерялась вольтметром универсальным В7-78, подключенным к двум другим противоположно расположенным контактам. Для обеспечения перпендикулярно пронизывающего образец магнитного поля образцы, закрепленные на несущем подложкодержателе помещались в магнитное поле установки СФП-5 (рисунок 2.3) с магнитной индукцией 300 мТл.

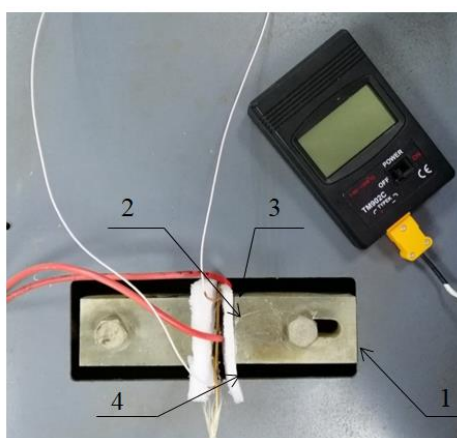


Рисунок 2.3 – Установка СФП-5 для проведения измерений с использованием эффекта Холла: 1 – магнит, 2 – непроводящие обкладки, 3 – плата с образцом, 4 – термопара

При проведении измерений возникающая ЭДС Холла может быть описана как:

$$U_H = a \cdot R_H \cdot j \cdot B, \quad (2.2)$$

где j – плотность тока через образец, А/м²;

B – магнитная индукция, $B = 300$ мТл;

e – заряд электрона, равный $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл;

b, a – геометрические размеры образца, м;

U_H – ЭДС Холла, В;

R_H – коэффициент Холла, м³/Кл.

Ток I протекает через образец, как показано на рисунке 2.2, через сечение $S = d \cdot b$. Таким образом, плотность тока будет равна:

$$j = \frac{I}{d \cdot b}, \quad (2.3)$$

где d – толщина исследуемой плёнки ИТО.

Коэффициент Холла, определяемый из формулы (2.2) равен:

$$R_H = \frac{U_H}{a \cdot j \cdot B}, \quad (2.4)$$

Проводимость определим следующим образом:

$$\sigma = \frac{I}{U} \cdot \frac{l}{d \cdot b}, \quad (2.5)$$

где U – напряжение на источнике питания, В.

Холловская подвижность носителей определяется по формуле:

$$\mu_H = R_H \cdot \sigma. \quad (2.6)$$

Тогда подвижность носителей выражается через нее по формуле:

$$\mu = \frac{\mu_H}{r_H}, \quad (2.7)$$

где r_H – Холл-фактор, коэффициент, значение которого определяется типом рассеяния носителей заряда в материале. В данных измерениях принимается $r_H = 1,18$, так как рассеяние при комнатной температуре происходит преимущественно на фононах.

Концентрацию носителей заряда определим по формуле:

$$n = \frac{r_H}{e \cdot R_H}. \quad (2.8)$$

Таким образом, из формул (2.7-2.8) следует, что, определив экспериментально постоянную Холла можно рассчитать концентрацию основных носителей и их подвижность [83].

2.1.3 Методика исследования электропроводности плёнок

При определении энергии активации аморфных плёнок наиболее удобным методом является измерение температурной зависимости электропроводности. Температурная зависимость электропроводности полупроводников определяется температурной зависимостью как концентрации носителей заряда, так и их подвижности [84].

В общем случае удельная электропроводность полупроводника может быть представлена формулой:

$$\sigma = ne\mu, \quad (2.9)$$

где n – концентрация носителей заряда;

e – заряд электрона;

μ – подвижность носителей заряда.

Под подвижностью понимают дрейфовую скорость частицы v_D в электрическом поле напряженностью $E = 1\text{В/см}$, т.е.

$$\mu = \frac{v_D}{E}. \quad (2.10)$$

В общем случае в полупроводниках под влиянием внешнего электрического поля дрейфовое движение совершают как электроны, так и дырки. Несмотря на то, что электроны и дырки движутся в противоположных направлениях, т.к. их заряды противоположны по знаку, направления электронной и дырочной составляющих дрейфового тока совпадают.

Поэтому для собственного полупроводника плотность дрейфового тока равна:

$$j = j_n + j_p = eE \cdot (N_i \mu_n + P_i \mu_p), \quad (2.11)$$

где N_i , μ_n , P_i , μ_p - концентрации и подвижности электронов и дырок, соответственно.

Собственная электропроводность равна:

$$\sigma = eN_i \mu_n + eP_i \mu_p. \quad (2.12)$$

Концентрация электронов и дырок в собственном полупроводнике, как уже говорилось выше, равны $N_i = P_i$ и определяются по формуле:

$$N_i = \sqrt{N_c N_v} \exp\left(-\frac{\Delta E_0}{2kT}\right), \quad (2.13)$$

где N_c, N_v - эффективные плотности квантовых состояний в зоне проводимости и валентной зоне, соответственно;

ΔE_0 - ширина запрещенной зоны.

Подвижность носителей заряда в значительно меньшей степени зависит от температуры по сравнению с температурной зависимостью их концентрации. Поэтому можно считать, что электропроводность полупроводника растет с температурой примерно по тому же закону, что и концентрация электронов и дырок:

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{\Delta E_0}{2kT}\right), \quad (2.14)$$

где σ_0 - электропроводность при $T \Rightarrow \infty$.

Если прологарифмировать выражение (2.14), то оно примет вид:

$$\ln(\sigma) = (\ln \sigma_0) - \left(\frac{\Delta E_0}{2k}\right) \cdot \left(\frac{1}{T}\right). \quad (2.15)$$

В координатах $\ln(\sigma), - (1/T)$ эта зависимость - прямая линия с углом наклона, тангенс которого пропорционален $\Delta E_0/2k$ (рисунок 2.4).

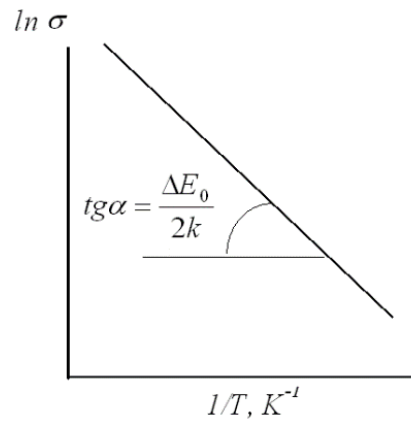


Рисунок 2.4 – Температурная зависимость электропроводности собственного полупроводника

В примесном полупроводнике зависимость $\sigma(T)$ более сложная. При низких температурах концентрация носителей заряда определяется интенсивностью процесса ионизации примесей, а $\mu \sim T^{3/2}$. При высоких температурах большая часть носителей заряда получается за счет генерации пар, а $\mu \sim T^{-3/2}$. В этом случае электропроводность примесного полупроводника можно выразить как сумму проводимости основной решетки $\sigma_{\text{осн}}$ и проводимости, обусловленной примесью $\sigma_{\text{пр}}$, т.е.

$$\sigma = \sigma_{\text{осн}} + \sigma_{\text{пр}} = \sigma_0 \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E_0}{2kT}\right) + \sigma \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right), \quad (2.16)$$

где ΔE - энергия активации примесных носителей заряда.

Зависимость $\ln \sigma - (1/T)$ для примесного полупроводника представлена на рисунке 2.5.

Для низких температур на кривой хорошо выделяется участок I примесной электропроводности. После того как примеси исчерпаны (участок II), электропроводность может несколько уменьшаться за счет падения подвижности носителей. Участок III соответствует собственной электропроводности.

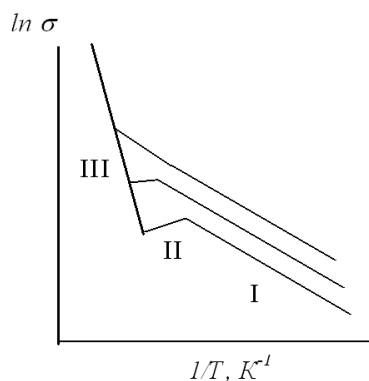


Рисунок 2.5 – Температурная зависимость электропроводности примесного полупроводника

В случае, когда концентрация примеси достаточно велика, участок II отсутствует. Процесс генерации электронно-дырочных пар в таком случае начинается, когда примеси еще не исчерпаны.

Следует отметить, что механизм электропроводности в пленках ИТО может несколько отличаться от описанного механизма электропроводности в полупроводниках вследствие вклада в него нескольких составляющих: электропроводность, обусловленная наличием донорных кислородных вакансий; примесная электропроводность, обусловленная наличием атомов четырехвалентного олова. Присутствие нескольких механизмов требует весьма нетривиального подхода к исследованию их вклада в общую электропроводность. В связи с этим в данной работе производилось снятие температурной зависимости электропроводности плёнок ИТО в области повышенных и пониженных температур.

Измерение температурной зависимости электропроводности в области повышенных температур осуществлялось с использованием подготовленной измерительной установки (рисунок 2.6). Подготовленные образцы прижимались к массивному корпусу резистивного нагревательного элемента (2), подключенного к источнику постоянного тока (1) с регулируемым выходным напряжением. Контроль температуры нагрева образца производился термопарой (6). Сопротивление образцов измерялось измерителем иммитанса E7-20 (5), подключенным к контактными площадкам образцов (4).

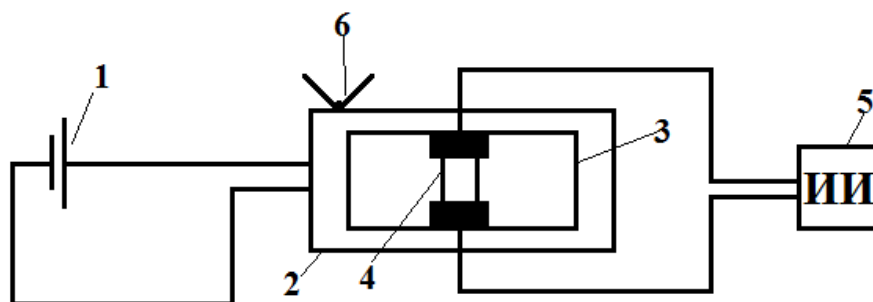


Рисунок 2.6 – Схема измерительной установки для снятия электропроводности плёнок ИТО при повышенных температурах:

1 – источник тока, 2 – нагревательный элемент, 3 – подложкодержатель, 4 – подложка с нанесенной пленкой ИТО, 5 – измеритель иммитанса, 6 – термопара

Исследование температурной зависимости электропроводности при отрицательных температурах проводилось с помощью термостата, куда загружался образец, как показано на рисунке 2.7.

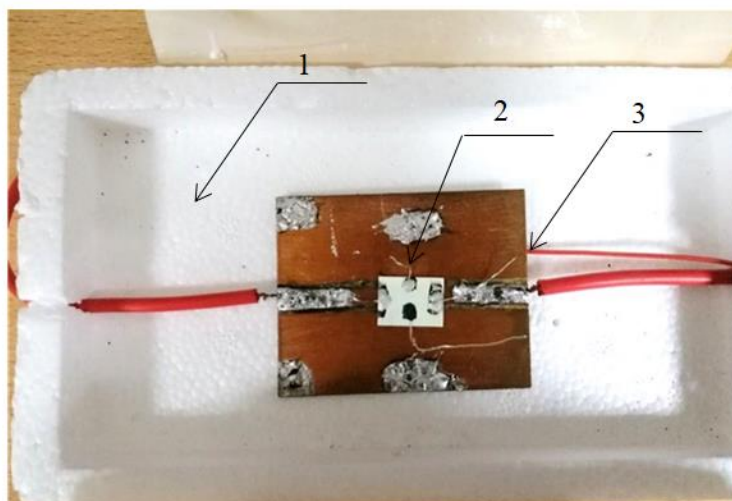


Рисунок 2.7 – Термостат для измерения температурной зависимости электропроводности плёнок ИТО при отрицательных температурах:

1 – термостат; 2 – плата с образцом; 3 – термопара

Термостат герметично закрывался, через отверстие в крышке заливался жидкий азот. При постепенном испарении азота и нагрева образца до комнатной температуры контролировалось сопротивление.

2.1.4 Методика исследования термо-ЭДС плёнок ИТО

Испытательный стенд для измерения термо-ЭДС включает в себя: датчик температуры, шаговый двигатель для перемещения по оси Y, нагреватель, образец, программу в среде ArduinoIDE для проведения испытаний в автоматическом режиме. ArduinoIDE позволяет проводить измерения при помощи виртуальных приборов. При проведении измерений используются следующие встроенные виртуальные приборы: источник питания 24 В, источник питания 5 В, устройство аналогового ввода\вывода, устройство цифрового ввода\вывода.

Источник питания 5 В реализует питание шагового двигателя. Регулируемый источник питания 24 В используется для питания нагревательного элемента. Измерение падения напряжения на датчике температуры реализуется при помощи устройства аналогового ввода\вывода.

Для измерения термо-ЭДС образец помещается в установку. Игла через источник тока нагревается постепенно и в процессе несколько раз опускается на образец, тем самым локально его нагревая.

Методика эксперимента заключается в измерении падения напряжения на образце при градиенте температур в месте касания нагретой иглы и подложки при комнатной температуре.

Термо-ЭДС определяется из эксперимента:

$$\alpha = \frac{\Delta U}{\Delta T}, \quad (2.17)$$

где ΔU – падение напряжения на горячем и холодном конце, В;

ΔT – разность температур горячей (игла) и холодной части (подложка), град.

Термо-ЭДС α выражается через разность уровней зоны проводимости и уровня Ферми для полупроводника n-типа проводимости. Поэтому по формуле (2.8) можно легко найти $E_C - E_F$:

$$\alpha \cdot T \cdot e = E_C - E_F + (r + 2) \cdot k \cdot T, \quad (2.18)$$

где T – температура окружающей среды, $T = 300$ К;

e – заряд электрона, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл;

r – показатель степени, $r = 2$ при рассеянии на ионах примеси [21];

k – постоянная Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.

Отсюда $E_C - E_F$ равно:

$$E_C - E_F = \alpha \cdot T \cdot e - (r + 2) \cdot k \cdot T, \quad (2.19)$$

По разности $E_C - E_F$ возможно определить степень вырождения полупроводника.

2.2 Методика приготовления исследуемых образцов

Приготовление образцов является важной частью исследования, поскольку это во многом определяет свойства исследуемых плёнок.

Для исследования электрофизических свойств плёнки ИТО осаждались на диэлектрических ситалловых подложках марки СТ-50-1 размером 600x480x0,6 мм.

В качестве подложек для исследования оптических свойств плёнок ИТО использовались подложки двух типов: покровное стекло толщиной 0,17 мм (для измерения оптических характеристик в видимом диапазоне) и кварцевое стекло КВ – 1 (для измерения оптических характеристик в инфракрасном диапазоне).

Исследование других характеристик плёнок ИТО проводилось при их нанесении на полупроводниковые структуры Si и InP.

Очистка. Перед нанесением тонких плёнок ИТО непосредственно перед помещением в вакуумную камеру подложки подвергали тщательной очистке [102].

Очистка ситалловых, стеклянных и кремниевых подложек проводилась в растворе перекиси водорода и аммиака в воде $H_2O_2:NH_4OH:H_2O = 1:1:4$. Полный технологический цикл очистки подложек по данной технологии включает: кипячение в указанном растворе в течение 20 мин, промывку в деионизованной воде, подогретой до 50–60 °С, в течение 5–10 мин (до полной отмывки от

раствора, т.е. до образования сплошной плёнки воды без разрывов), кипячение в дистиллированной воде в течение 10 мин с последующей обработкой в парах изопропилового спирта в течение 30 мин. Такая методика обладает лучшими обезжиривающими свойствами по сравнению с органическими растворителями и не вызывает повышения микронеровностей поверхности [103].

Очистка подложек InP производилась путем обработки в диметилформамиде (ДМФА), промывки в изопропиловом спирте (ИПС), затем обработка в водном растворе соляной кислоты $\text{H}_2\text{O}:\text{HCl} = 10:1$.

После отмывки в деионизованной воде подложки извлекали таким образом, чтобы на поверхности оставалось минимальное количество жидкости, капли которой после промывки сдувались сжатым азотом [103].

Напыление. Прошедшие очистку подложки устанавливались в подложкодержатели и загружались в рабочую камеру установки магнетронного распыления Kurt J. Lesker.

Для получения плёнки высокого качества важно минимизировать вероятность захвата примесей выбитыми из катода-мишени атомами. Это обеспечивается как предварительной очисткой мишени в среде рабочей атмосферы («тренировка» мишени), так и обеспечением чистоты самой атмосферы.

С целью повышения чистоты рабочей атмосферы на этапе предварительного разряжения атмосферы в рабочей камере форвакуумным насосом проводилась продувка каналов подачи рабочих газов. В качестве рабочей атмосферы использовались следующие газы: аргон, кислород и их смесь. Соотношение содержания газов в составе рабочей смеси производилось путем регулировки потоков натекаемых газов регуляторами расхода газа РРГ-12.

После откачки остаточной атмосферы и создания в вакуумной камере рабочей атмосферы производилось непосредственное напыление плёнок ИТО. Последующая выгрузка подложек с напыленными плёнками происходила через 10 минут после окончания напыления для их остывания в вакууме.

Высокотемпературный отжиг. После напыления плёнок ИТО с целью получения кристаллической фазы производился их отжиг. Отжиг производился в высокотемпературной трубчатой кварцевой печи в среде воздуха или азота. При проведении термических процессов отжига в среде азота при включении печи происходит ее продувка азотом и последующее поддержание избыточного давления азота в камере печи. Для обеспечения требуемой температуры загрузка образцов производилась только после выхода печи на рабочий режим.

2.3 Технологии осаждения плёнок ИТО методом реактивного магнетронного распыления

Технология напыления плёнок ИТО методом магнетронного распыления нами была хорошо отработана и описана ранее в [82, 83]. Она обеспечивает достижение поверхностного сопротивления в $10 \text{ Ом}/\square$ при прозрачности плёнок, на уровне 87% и предполагает распыление металлической мишени $\text{In}(90\%)/\text{Sn}(10\%)$ в атмосфере газовой смеси $\text{Ar}+\text{O}_2$, конденсацию окисленных атомов индия и олова на нагретую до температуры $200\text{--}250^\circ\text{C}$ подложку, и проведение последующего отжига в вакууме в течение 30–40 минут при температуре 250°C . При внедрении данной технологии на промышленную установку магнетронного напыления Kurt J. Lesker на предприятии АО «НИИ ПП» (г. Томск), возникла потребность в разработке технологии напыления плёнок ИТО на холодную подложку сопротивлением менее $10 \text{ Ом}/\square$.

Специфика напыления ИТО на холодную подложку хорошо исследована в работах [32, 104]. Авторы данных работ приходят к выводу, что при напылении ИТО на холодную подложку процесс окисления на самой подложке практически прекращается. Поэтому допуск в сторону недостатка кислорода гораздо меньше, чем при напылении на горячую подложку. Содержание кислорода в составе газовой смеси должно быть таким, чтобы весь металл успевал окислиться до состояния полного окисла точно к моменту построения структурной сетки плёнки. Таким образом, указанный подход предполагает сильную зависимость между

величиной удельного сопротивления, ее прозрачности, скоростью роста плёнки и парциальным давлением кислорода в камере. В связи с этим, отработка технологического процесса нанесения плёнок ИТО потребовала практического решения следующих задач.

1. Измерение скорости напыления ИТО

Исследования, проводимые в [32, 82, 83, 92, 104, 105] показали, что при осаждении плёнок ИТО в кислородосодержащей атмосфере на подложки при $T_{II} = 300$ К зависимость сопротивления плёнок от скорости напыления имеет минимум, который соответствует оптимальному значению скорости роста плёнки, обладающей максимальной прозрачностью и минимальным сопротивлением. Экспериментально было установлено, что такая оптимальная скорость осаждения составляет 2 – 3,5 Å/с. Однако, учитывая, что мишень изготовлена из легкоплавких металлов In/Sn, то для предотвращения плавления мишени предпочтительней для работы является нижняя граница этого диапазона.

Для подбора тока магнетронного разряда, обеспечивающего указанную оптимальную скорость роста плёнки ИТО, проводились их пробные осаждения магнетронным распылением на постоянном токе в рабочей атмосфере Ar(50%)/O₂(50%) при разных токах газового разряда (0,2А; 0,3А; 0,4А) в течении одинакового времени для выбора режима (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Измерение скорости осаждения плёнок ИТО

Режим 1: Ток разряда 0,2А; время напыления 10 минут Измеренная скорость напыления 1 Å/с	
до отжига: $\rho_s = 80$ МОм/□ $d = 0,06$ мкм	после отжига в N ₂ (450°С, 25 минут): $\rho_s = 40$ кОм/□ $d = 0,057$ мкм
Режим 2: Ток разряда 0,3А; время напыления 10 минут Измеренная скорость напыления 1,9 Å/с	
до отжига: $\rho_s = 100$ МОм/□ $d = 0,11$ мкм	после отжига в N ₂ (450°С, 25 минут): $\rho_s = 34$ кОм/□ $d = 0,09$ мкм
Режим 2: Ток разряда 0,4А; время напыления 10 минут Измеренная скорость напыления 3 Å/с	
до отжига: $\rho_s = 100$ МОм/□ $d = 0,18$ мкм	после отжига в N ₂ (450°С, 25 минут): $\rho_s = 26$ кОм/□ $d = 0,15$ мкм

Таким образом, оптимальную скорость напыления тонких плёнок ИТО в смеси газов $Ar + O_2$ в $2\text{Å}/\text{с}$ можно обеспечить током разряда магнетронной системы в $0,3A$.

II. Подбор оптимального соотношения газов Ar и O_2 в составе газовой смеси

Важнейшим этапом отработки технологии напыления плёнок ИТО является подбор состава газовой смеси Ar / O_2 , необходимой для получения низкоомных плёнок ИТО. Диапазон изменения процентного содержания кислорода в составе газовой смеси, встречающийся у различных научных коллективов, изменяется в пределах от 10% до 35% [32, 104 – 106]. Следует отметить, что оптимальное соотношение газов Ar и O_2 в составе рабочей смеси для каждой конкретной установки может изменяться в некоторых пределах, в зависимости от скорости откачки атмосферы из вакуумной камеры и мощности разряда магнетронной распылительной системы.

Экспериментальный подбор оптимального соотношения парциальных давлений аргона и кислорода осуществлялся путем постепенного снижения процентного содержания O_2 в составе газовой смеси от напыления к напылению, постепенно снижая его содержание на 3-5% относительно начального содержания в 35%. Такое снижение производилось до тех пор, пока в растущей пленке не будут появляться недоокисленные атомы In и Sn , т.е. пока цвет полученных образцов не изменится с прозрачного на бурый. Проводимость, и прозрачность таких слоев значительно повышаются посредством последующего отжига в кислородосодержащей атмосфере, в процессе которого происходит перестройка структурной сетки ИТО и неполные окислы восстанавливаются до полных с одновременным образованием кислородных вакансий.

Результаты определения оптимального соотношения газов Ar и O_2 в составе рабочей газовой смеси приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Определение оптимального соотношения газов Ar и O₂ в составе рабочей газовой смеси

Режим 1: Ток разряда 0,3А; время напыления 12 минут. Получаемые плёнки недоокисленные (черный цвет). Содержание кислорода 16%	
отжиг в N ₂ (450°; 25 минут): ρ _S =2,8Ом/□	отжиг в воздухе (450°; 25 минут): ρ _S =7Ом/□
Режим 2: Ток разряда 0,3А; 12 минут. Получаемые плёнки недоокисленные (бурый цвет). Содержание кислорода 25%	
отжиг в N ₂ (450°; 25 минут): ρ _S =8,4 Ом/□	отжиг в воздухе (450°; 25 минут): ρ _S =3Ом/□
Режим 3: Ток разряда 0,3А; 12 минут. Получаемые плёнки окисленные (прозрачный цвет). Содержание кислорода 29%	
отжиг в N ₂ (450°; 25 минут): ρ _S =14 Ом/□	отжиг в воздухе (450°; 25 минут): ρ _S =32Ом/□
Режим 4: Ток разряда 0,3А; 12 минут. Получаемые плёнки окисленные (прозрачный цвет). Содержание кислорода 33%	
отжиг в N ₂ (450°; 25 минут): ρ _S =33Ом/□	отжиг в воздухе (450°; 25 минут): ρ _S =99 кОм/□
Режим 5: Ток разряда 0,3А; 12 минут. Получаемые плёнки окисленные (прозрачный цвет). Содержание кислорода 50%	
отжиг в N ₂ (450°; 25 минут): ρ _S =22Ом/□	отжиг в воздухе (450°; 25 минут): ρ _S =43кОм/□

Анализируя результаты проведенных исследований можно сказать, что оптимальные соотношения газов Ar и O₂ в составе рабочей газовой смеси, обеспечивающие наименьшее сопротивление плёнок ИТО следующие:

- 1) 25% O₂ + 75% Ar при токе разряда 0,3А с последующим отжигом в атмосфере воздуха (технология №1);
- 2) 29% O₂ + 71% Ar при токе разряда 0,3А с последующим отжигом в атмосфере N₂ (технология №2).

Учитывая экспоненциальную зависимость удельного сопротивления тонких плёнок от их толщины многими коллективами оговаривается, что оптимальное соотношение оптических и электрических свойств плёнок ИТО достигается при толщине 120 – 150 нм [34, 66, 75]. Таким образом после установления оптимального соотношения газов Ar и O₂ в составе рабочей газовой смеси была

произведена корректировка времени напыления для обеспечения толщины напыляемой плёнки 130 нм. Вследствие чего время напыления было уменьшено до 10 минут.

III. Отработка режима отжига плёнок ИТО

Серии образцов, напыленных по выбранным на этапе II режимам, после их напыления подвергались высокотемпературному отжигу при температурах 400°C, 500°C и 600°C, со временем выдержки 15 или 25 минут. После проведенного высокотемпературного отжига проводился контроль поверхностного сопротивления плёнок ИТО и коэффициента пропускания (рисунки 2.8 и 2.9).

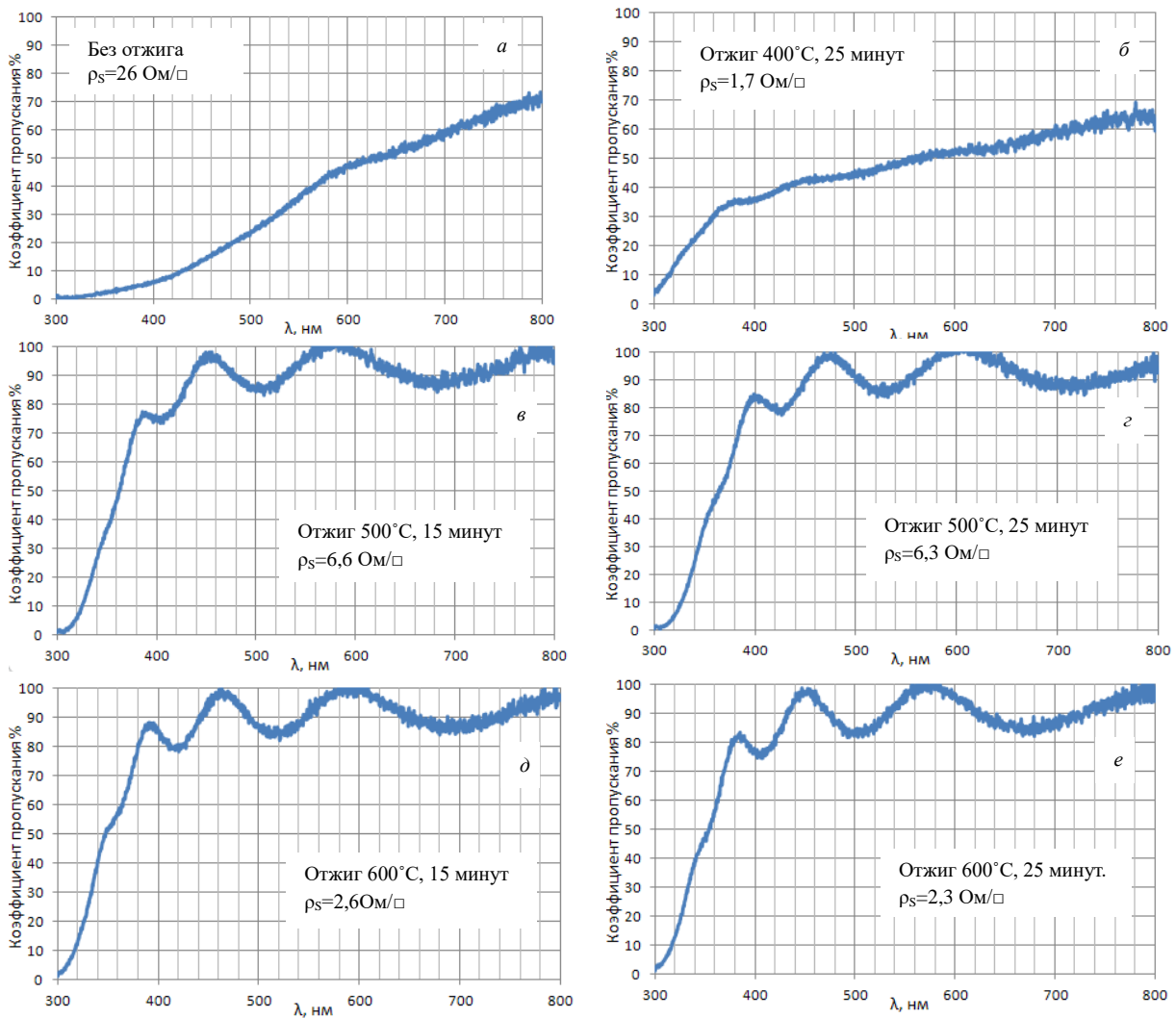


Рисунок 2.8 – Спектры пропускания плёнок ИТО, напыленных по технологии №1 (состав рабочей атмосферы 25% O₂ / 75% Ar, ток разряда 0,3А, время напыления 10 минут) после отжига в среде воздуха в различных режимах

Анализ полученных значений величин поверхностного сопротивления и коэффициентов пропускания в диапазоне видимого излучения, полученные при напылении и отжиге экспериментальных образцов, позволил сделать заключение о том, что действительно существует взаимосвязь и корреляция между оптическими и электрическими свойствами плёнок ИТО, описанная в п. 1.1.2. Различие видов спектров пропускания образцов плёнок ИТО, напыленных по технологиям №1 и №2 (рисунки 2.8 и 2.9), вероятнее всего вызвано различием кинетических характеристик носителей заряда плёнок ИТО.

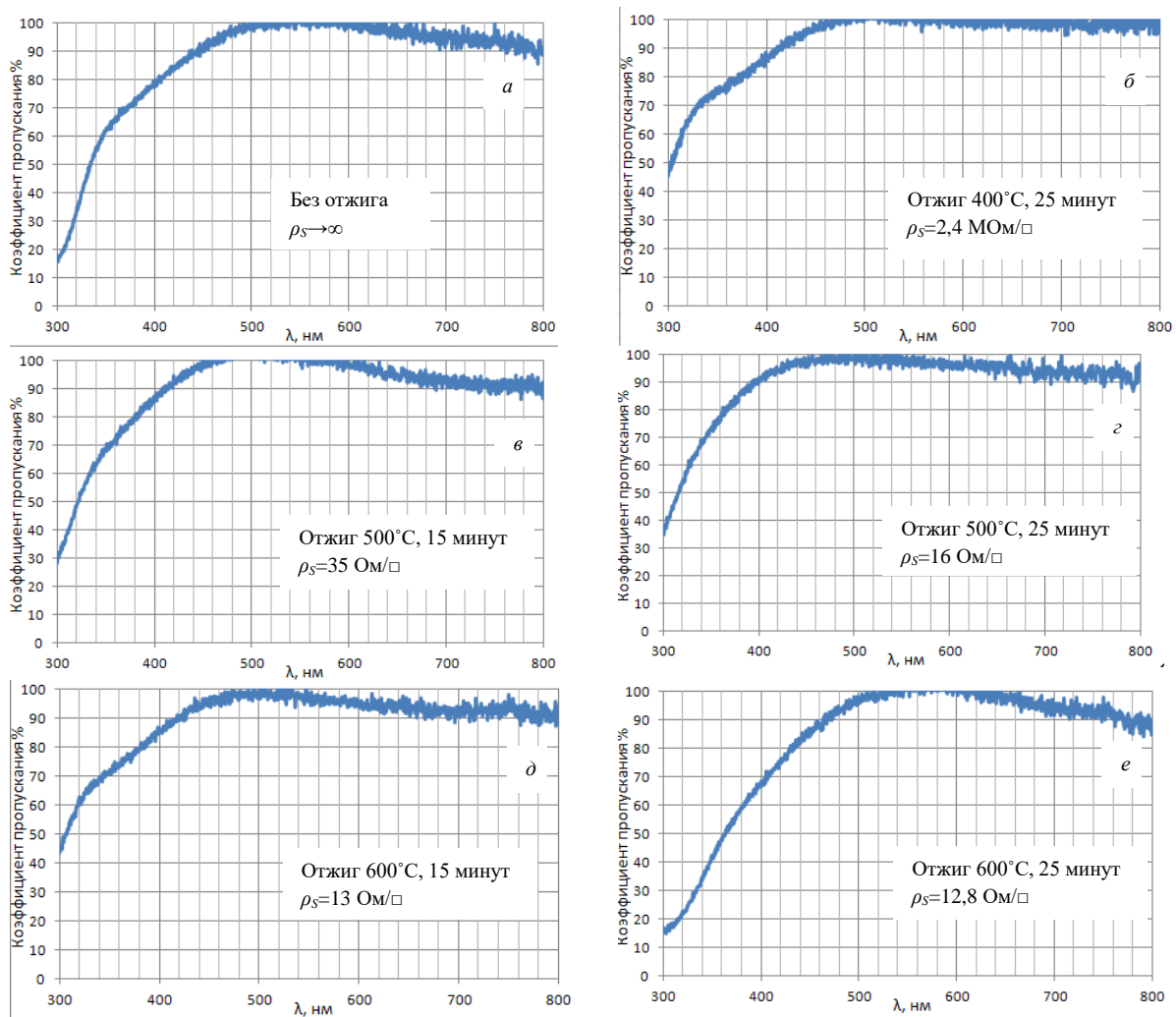


Рисунок 2.9 – Спектры пропускания плёнок ИТО, напыленных по технологии №2 (состав рабочей атмосферы 29% O_2 / 71% Ar , ток разряда 0,3А, время напыления 10 минут) после отжига в среде азота в различных режимах

При проведении отжига образцов было выявлено, что при длительном высокотемпературном отжиге (свыше 20-25 минут) происходит значительное снижение толщины напыленного слоя (более чем на 10-15%) относительно первоначальной толщины. Вероятно, это связано с уплотнением плёнки ИТО при ее высокотемпературном нагреве, что просматривается на микрофотографиях поверхности образцов плёнок ИТО, напыленных по технологии №2, до и после отжига (рисунок 2.10). Микрофотографии плёнок ИТО были получены с помощью растрового электронного микроскопа Hitachi TM-1000.

Морфология поверхности плёнок ИТО неоднородная, с образованием на поверхности плёнки вздутий (рисунок 2.10 а). Данные вздутия, вероятно, обусловлены следующим: во-первых, захватом атмосферы рабочих газов при росте плёнки, а во-вторых, десорбированием газов с поверхности подложки во время напыления, т.к. напыление производилось на подложку при комнатной температуре. Размер вздутий лежит в диапазоне от 2,5 до 10 мкм.

Вследствие отжига в атмосфере азота произошло выравнивание поверхности плёнки из-за схлопывания вздутий (рисунок 2.10 б). Размер таких образований достигает 5 мкм.

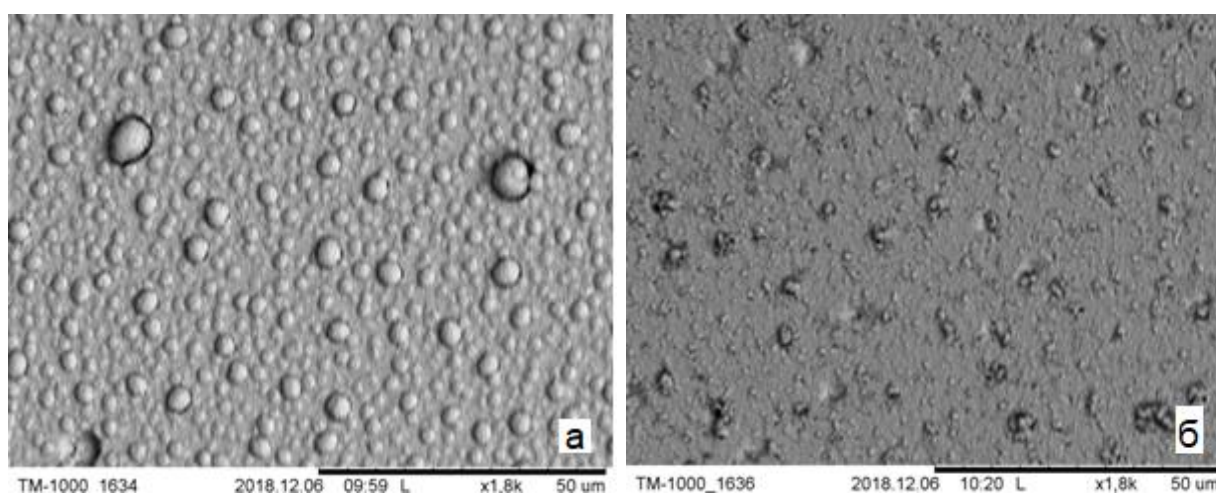


Рисунок 2.10 – Микрофотография поверхности образцов ИТО, напыленных по технологии №2 до (а) и после отжига (б)

Таким образом, для достижения оптимальных электрических и оптических характеристик плёнок ИТО для дальнейших исследований были использованы следующие режимы напыления:

1) Распыление металлической мишени In/Sn методом реактивного магнетронного распыления в атмосфере $O_2(25\%)/Ar(75\%)$ в течении 10 минут при токе разряда 0,3 А с последующим отжигом в атмосфере воздуха при температуре $600^\circ C$ в течении 20 минут.

2) Распыление металлической мишени In/Sn методом реактивного магнетронного распыления в атмосфере $O_2(29\%)/Ar(71\%)$ в течении 10 минут при токе разряда 0,3 А с последующим отжигом в атмосфере азота при температуре $600^\circ C$ в течении 20 минут.

Расширенные спектры пропускания плёнок ИТО, напыленных по данным технологиям были измерены с помощью спектрофотометра Shimadzu UV-3600 plus на кварцевых подложках и представлены на рисунке 2.11.

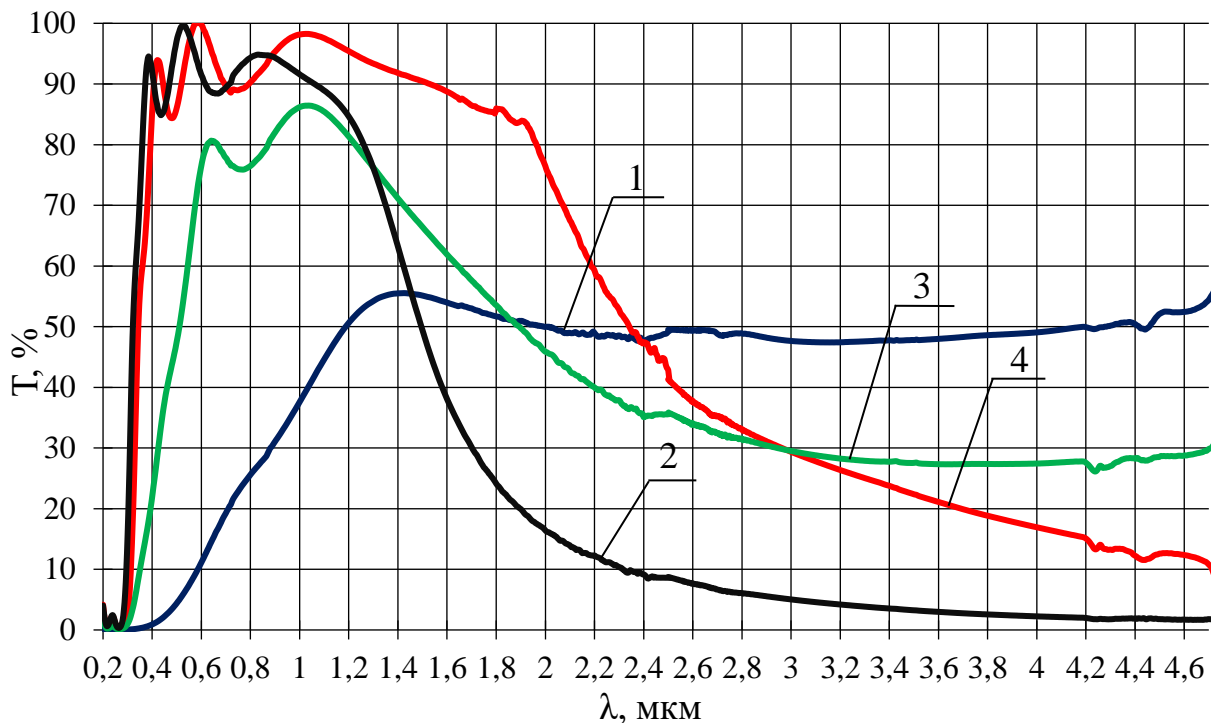


Рисунок 2.11 – Спектры пропускания плёнок ИТО на кварцевых подложках: напыленные по технологии №1 без отжига (1) и после отжига (2); напыленные по технологии №2 без отжига (3) и после отжига (4)

Измеренные спектры пропускания плёнок ИТО, напыленных по разработанным технологиям, показывают, что в результате проведения высокотемпературного отжига максимальное пропускание наблюдается в видимом диапазоне длин волн от 400 нм до 900 нм. Сохранение высокого значения коэффициента пропускания в диапазоне длин волн от 1200 нм до 1800 нм плёнок ИТО напыленных по технологии №2 после проведения высокотемпературного отжига делает возможным их применение в качестве прозрачного контакта для устройств радиофотоники.

2.5 Электрические свойства плёнок ИТО

Концентрация и подвижность носителей заряда

Основными электрическими параметрами плёнок ИТО являются удельное сопротивление, концентрация и подвижность носителей заряда. С целью изучения влияния технологических режимов напыления плёнок ИТО на указанные электрические параметры у образцов, изготовленных по двум отработанным в п.2.2 технологиям нами были измерены концентрации и подвижности носителей заряда путем проведения холловских измерений (п.2.1.4). Полученные результаты исследования приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Электрофизические характеристики плёнок ИТО, напыленных по разным технологиям №1 и №2

		Технология напыления плёнок ИТО	
		Технология №1	Технология №2
Без отжига	ρ_v , Ом·см	$2,73 \cdot 10^{-4}$	$> 8,0$
	n , см ⁻³	$1,2 \cdot 10^{22}$	-
	μ , см ² /(В·с)	1,9	-
После отжига	ρ_v , Ом·см	$3 \cdot 10^{-5}$	$1,66 \cdot 10^{-4}$
	n , см ⁻³	$1,45 \cdot 10^{22}$	$6,51 \cdot 10^{20}$
	μ , см ² /(В·с)	14,4	57,7

Полученные результаты позволили сделать однозначный вывод о том, что проведение высокотемпературного отжига плёнок ИТО после их синтеза в общем

случае приводит к снижению величины удельного сопротивления плёнок. При этом, снижение удельного сопротивления обусловлено одновременным увеличением как концентрации свободных носителей заряда, так и их подвижности.

Увеличение концентрации свободных носителей вероятнее всего связано с тем, что в результате высокотемпературного отжига происходит активация примесных атомов Sn^{4+} , замещающих атомы In^{3+} в узлах кристаллической решетки ИТО [34, 93]. Одновременно происходит диффундирование из объема плёнки ИТО атомов O^{2-} , внедренных между узлами кристаллической решетки или расположенных на границах зерен. Образующиеся кислородные вакансии и замена трехвалентного индия на атомы четырехвалентного олова в узлах кристаллической решетки действуют как доноры для электронов, увеличивая их концентрацию [107].

Предложенную теорию об увеличении концентрации носителей заряда в результате диффундирования атомов кислорода подтверждают микрофотографии поверхности образцов плёнок ИТО, до и после отжига (рисунок 2.12).

Увеличение подвижности носителей заряда на порядок после проведения высокотемпературного отжига наиболее вероятно вызвано повышением структурного совершенства плёнок ИТО. Для определения фазового состава с использованием рентгеновского дифрактометра *ARL X'TRA* (Швейцария) с полупроводниковым Si (Li) детектором Пельтье был проведен рентгенофазовый анализ образцов плёнок ИТО до и после отжига (рисунок 2.12).

Анализ полученных рентгенограмм показал, что в процессе отжига плёнок ИТО, напыленных по обеим технологиям происходит частичное образование кристаллической структуры в объеме плёнки, однако большую часть плёнки продолжает составлять аморфная фаза. Ориентация плоскостей отражения (222) преобладает и соответствует плотноупакованной плоскости [111], в направлении которой происходит наиболее интенсивный рост кристаллов.

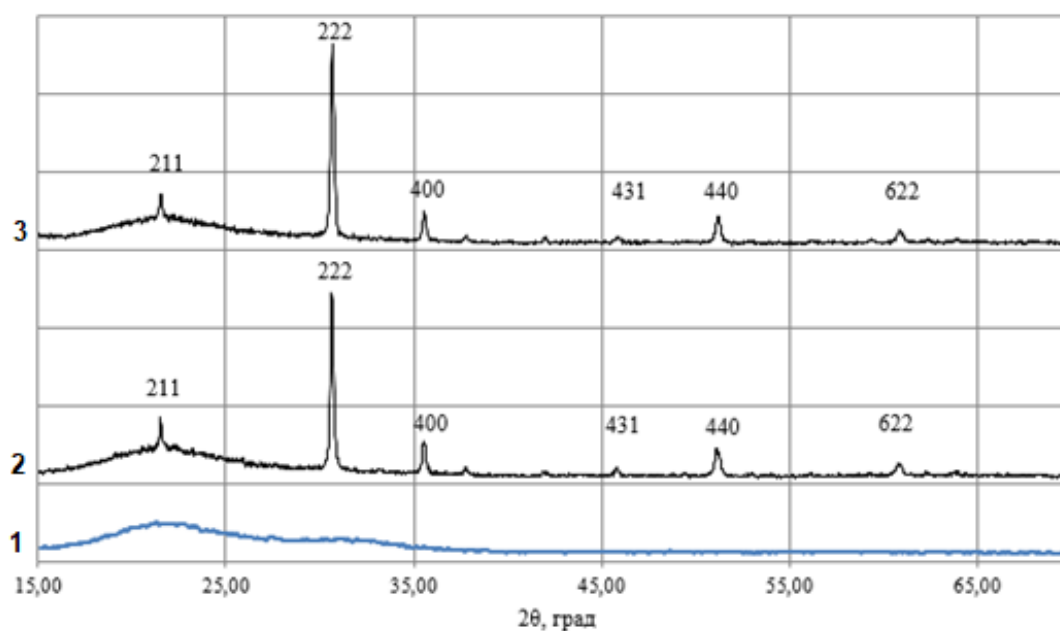


Рисунок 2.12 – Рентгенограмма плёнок ИТО до и после отжига:

- 1 – до отжига; 2 – плёнки ИТО, напыленные по технологии №1 после отжига;
3 – плёнки ИТО, напыленные по технологии №2 после отжига

Подобный результат был получен и коллективом авторов в [25], где с целью проверки влияния температуры отжига на структуру получаемых плёнок проводился их рентгенофазный анализ. Результаты показали, что исходные плёнки являются аморфными, в то время как рентгенограмма отожженных образцов обнаружила их кристаллическое строение. При этом размер кристаллитов увеличивается с увеличением температуры отжига и давления в камере. О значительном влиянии режима отжига на характеристики плёнок ИТО так же свидетельствуют результаты работ [26 – 28].

Различный характер изменения электрофизических характеристик плёнок ИТО, напыленных по технологиям №1 и №2 после проведения высокотемпературного отжига отражается также и на спектрах пропускания плёнок (рисунки 2.8 и 2.9 соответственно), что связано с взаимодействием компоненты электрического поля световой волны с электронами легированного материала, описанным в п. 1.1.2. При этом, более высокий коэффициент пропускания плёнок ИТО, напыленных по технологии №2 (рисунок 2.9),

коррелирует с результатами, описанными в [31] и объясняется, слабым взаимодействием электронов проводимости с компонентой электрического поля света. При этом, удельное сопротивление плёнок ИТО, напыленных по технологии №2, все равно остается приемлемым за счет достижения максимального значения подвижности электронов проводимости

С целью установления положения уровня Ферми для носителей заряда плёнок ИТО, напыленных по технологии №2 и подверженных высокотемпературному отжигу в среде азота, были сняты экспериментальные данные по термо-ЭДС и представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Экспериментальные данные по термо-ЭДС плёнок ИТО напыленных по технологии №2 и подверженных высокотемпературному отжигу в среде азота

Температура иглы $T_1, ^\circ\text{C}$	Температура подложки $T_2, ^\circ\text{C}$	Падение напряжения, мВ	Термо-ЭДС, мВ/град
33	30	0,2	0,067
40	30	0,5	0,05
50	30	1,2	0,06
60	30	1,5	0,05
70	30	1,8	0,045

Интегральная термо-ЭДС по формуле (2.8) равна:

$$\alpha = \frac{\Delta U}{\Delta T} = \frac{1,8 - 0}{70 - 30} = 0,045 \frac{\text{мВ}}{\text{град}} = 4,5 \cdot 10^{-5} \frac{\text{В}}{\text{град}}$$

Рассчитанная по формуле (2.10) разность энергий $E_C - E_F$ равна:

$$\begin{aligned} E_C - E_F &= 4 \cdot 10^{-5} \cdot 300 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} - (2 + 2) \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 = \\ &= -1,44 \cdot 10^{-20} \text{ Дж} = -0,09 \text{ эВ.} \end{aligned}$$

Таким образом, уровень Ферми лежит в зоне проводимости и полупроводник можно считать вырожденным. Такое утверждение также соответствует результатам исследований, приведенных в [29].

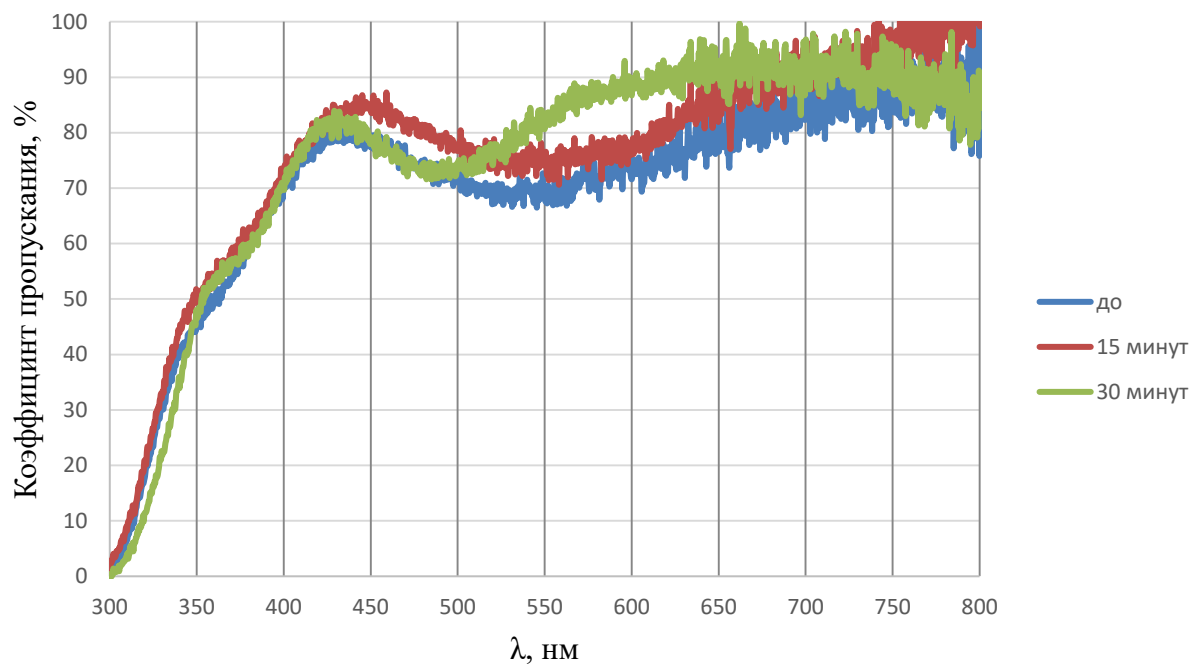
2.5 Температурная стабильность электрических свойств плёнок ITO

В связи с тем, что технологический маршрут изготовления полупроводниковых приборов микро- и наноэлектроники включает в себя некоторые операции, связанные с дополнительным высокотемпературным прогревом полупроводниковых структур с сформированными на их поверхности покрытиям, было проведено исследование температурной стабильности электрических параметров плёнок ITO, напыленных по разработанным технологиям [95, 96].

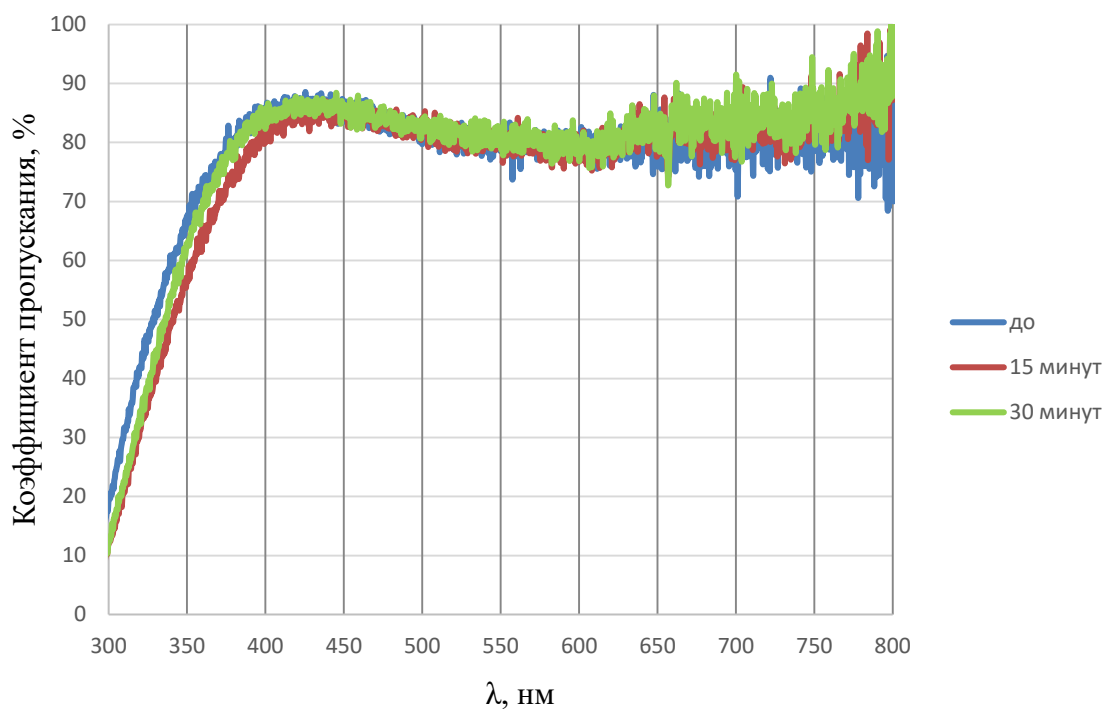
В ходе проведения исследований подготовленные образцы плёнок ITO, напыленные по технологии №1 и технологии №2 после напыления нагревались в резистивной печи до 600°C в атмосфере воздуха и выдерживались временные диапазоны 15 и 45 минут, после которых проводился контроль удельного сопротивления четырехзондовым методом, определение концентрации и подвижности носителей зарядов путем проведения Холловских измерений, а также контроль изменения спектра пропускания. Результаты измерений представлены в таблице 2.5 и на рисунке 2.13.

Таблица 2.5 – Изменение электрических свойств плёнок ITO при их высокотемпературной выдержке

		Высокотемпературная выдержка		
		Исходные образцы	Нагрев до 600°C и выдержка 15 минут	Дополнительная выдержка 30 минут при 600°C
Технология №1	ρ_V , Ом·см	$3 \cdot 10^{-5}$	$5,46 \cdot 10^{-5}$	$6,37 \cdot 10^{-5}$
	n , см ⁻³	$1,45 \cdot 10^{22}$	$8,42 \cdot 10^{21}$	$7,38 \cdot 10^{21}$
	μ , см ² /(В·с)	14,4	13,6	13,3
Технология №2	ρ_V , Ом·см	$1,66 \cdot 10^{-4}$	$2,17 \cdot 10^{-4}$	$2,46 \cdot 10^{-4}$
	n , см ⁻³	$6,51 \cdot 10^{20}$	$5,54 \cdot 10^{20}$	$5,16 \cdot 10^{20}$
	μ , см ² /(В·с)	57,7	52,0	49,3



а



б

Рисунок 2.13 – Спектры пропускания плёнок ИТО до и после высокотемпературной выдержки в среде воздуха;
а) для образцов, напыленных по технологии №1;
б) для образцов, напыленных по технологии №2

Анализ полученных результатов по исследованию температурной стабильности параметров плёнок ИТО, напыленных по отработанным в данной работе технологиям, показал, что высокотемпературная выдержка плёнок ИТО в атмосфере воздуха ведет к увеличению их поверхностного сопротивления.

Анализ изменения значений параметров носителей заряда в исследуемых образцах показывает, что при выдержке плёнок ИТО в атмосфере воздуха при высоких температурах изменение их электропроводности происходит именно за счет снижения концентрации носителей заряда. Это обусловлено вероятно тем, что кислородные вакансии, присутствующие в пленках ИТО при их нагреве занимают атомарным кислородом из окружающей среды. В результате занятия кислородных вакансий, являющихся донорными центрами, концентрация носителей заряда значительно снижается. При этом, уменьшение подвижности носителей заряда в пленках ИТО при их высокотемпературной выдержке в среде воздуха так же, вероятно, вызван дефектными нарушениями в объеме плёнок ИТО.

Сравнение изменений спектральных зависимостей коэффициента пропускания образцов плёнок ИТО до и после их высокотемпературной выдержки в среде воздуха показало, что изменения в концентрации носителей заряда в пленке ИТО сказывается на изменении их спектра пропускания. Наиболее явное отличие спектров пропускания в результате высокотемпературной выдержки наблюдается у образцов, напыленных по технологии № 1, что связано с значительным изменением концентрации электронов проводимости. Изменение спектра пропускания образцов плёнок ИТО, напыленных по технологии №2 практически не наблюдается.

2.6 Стабильность электрических свойств плёнок ИТО при выполнении операции фотолитографии

При применении плёнок ИТО в технологии изготовления полупроводниковых приборов микро- и наноэлектроники для формирования топологического рисунка обязательным являются операции фотолитографии.

Приняв во внимание что операция фотолитографии требует в своем выполнении несколько различных химических обработок в ходе работы было проведено исследование стабильности электрических свойств плёнок ИТО к химическим обработкам при выполнении операции фотолитографии.

Для исследования влияния операции фотолитографии на поверхностное сопротивление плёнок ИТО у подготовленных образцов, напыленных по разработанным технологиям, измерялась их поверхностное сопротивление сразу же после напыления и проведения высокотемпературного отжига, после нанесения, засветки и снятия фоторезиста, а также и после операции допроявления. Результаты измерения поверхностного сопротивления исследуемых образцов приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Изменение электрических свойств плёнок ИТО при выполнении операции фотолитографии

Плёнки ИТО, напыленные по технологии №1		Плёнки ИТО, напыленные по технологии №2	
исходные образцы	после отжига	исходные образцы	после отжига
Первоначальное сопротивление после приготовления образцов:			
$\rho_s=26 \text{ Ом}/\square$	$\rho_s=2,3 \text{ Ом}/\square$	$\rho_s \rightarrow \infty$	$\rho_s=12,8 \text{ Ом}/\square$
После нанесения, засветки и снятия ФР:			
$\rho_s=26 \text{ Ом}/\square$	$\rho_s=3,3 \text{ Ом}/\square$	$\rho_s \rightarrow \infty$	$\rho_s=13,2 \text{ Ом}/\square$
После допроявления:			
$\rho_s=26,6 \text{ Ом}/\square$	$\rho_s=5,3 \text{ Ом}/\square$	$\rho_s \rightarrow \infty$	$\rho_s=13,7 \text{ Ом}/\square$

Таким образом образцы плёнок, напыленные в атмосфере с 29% содержанием кислорода показали увеличение сопротивления на 8,5 % при проведении операции фотолитографии и на 27% после допроявления.

2.7 Механизмы электропроводности плёнок ИТО

Наряду с исследованиями электрических свойств плёнок ИТО, описанными в п. 2.4 особую актуальность представляет изучение механизма их электропроводности и изменения энергии активации электропроводности. Четкие

знания механизма электропроводности плёнок ИТО, и взаимосвязи энергии активации электропроводности с энергетическими характеристиками примесных атомов необходимы для получения наилучших электрических характеристик плёнок ИТО, синтезированных при различных условиях, а также для формирования приборов твердотельной и оксидной электроники [4].

Исследование механизма электропроводности плёнок ИТО проводилось на образцах, изготовленных по технологии №2 (не подвергавшихся отжигу и с проведением отжига в среде азота после напыления образцов) в связи с тем, что их электрофизические характеристики оказались более стабильными при высокотемпературном нагреве (п.2.5) и обладают лучшим спектром пропускания (п.2.4). Исследования механизма электропроводности плёнок ИТО проводились по методике, описанной в п.2.1.3 [89].

Экспериментальные температурные зависимости были сняты с нескольких образцов, усреднены и, учитывая, что $\sigma \sim 1/R$, перестроены в координатах $\ln(1/R)$ от $1/T$ (рисунок 2.14).

Приведенные температурные зависимости электропроводности образцов плёнок ИТО, напыленных по технологии №2 с последующим отжигом в среде воздуха и без него показывают существенное отличие в механизмах их электропроводности.

Температурная зависимость электропроводности образцов, не подвергавшихся отжигу после напыления, имеет возрастающий вид, схожий с соответствующей зависимостью для высоколегированного примесного полупроводника (рисунок 2.5).

Электропроводность образцов, подверженных высокотемпературному отжигу после напыления, с увеличением температуры монотонно возрастает, но после нагрева до 400°C стремительно снижается. Данный результат указывает на кардинальную смену механизма электропроводности, который становится ближе к электропроводности металлов.

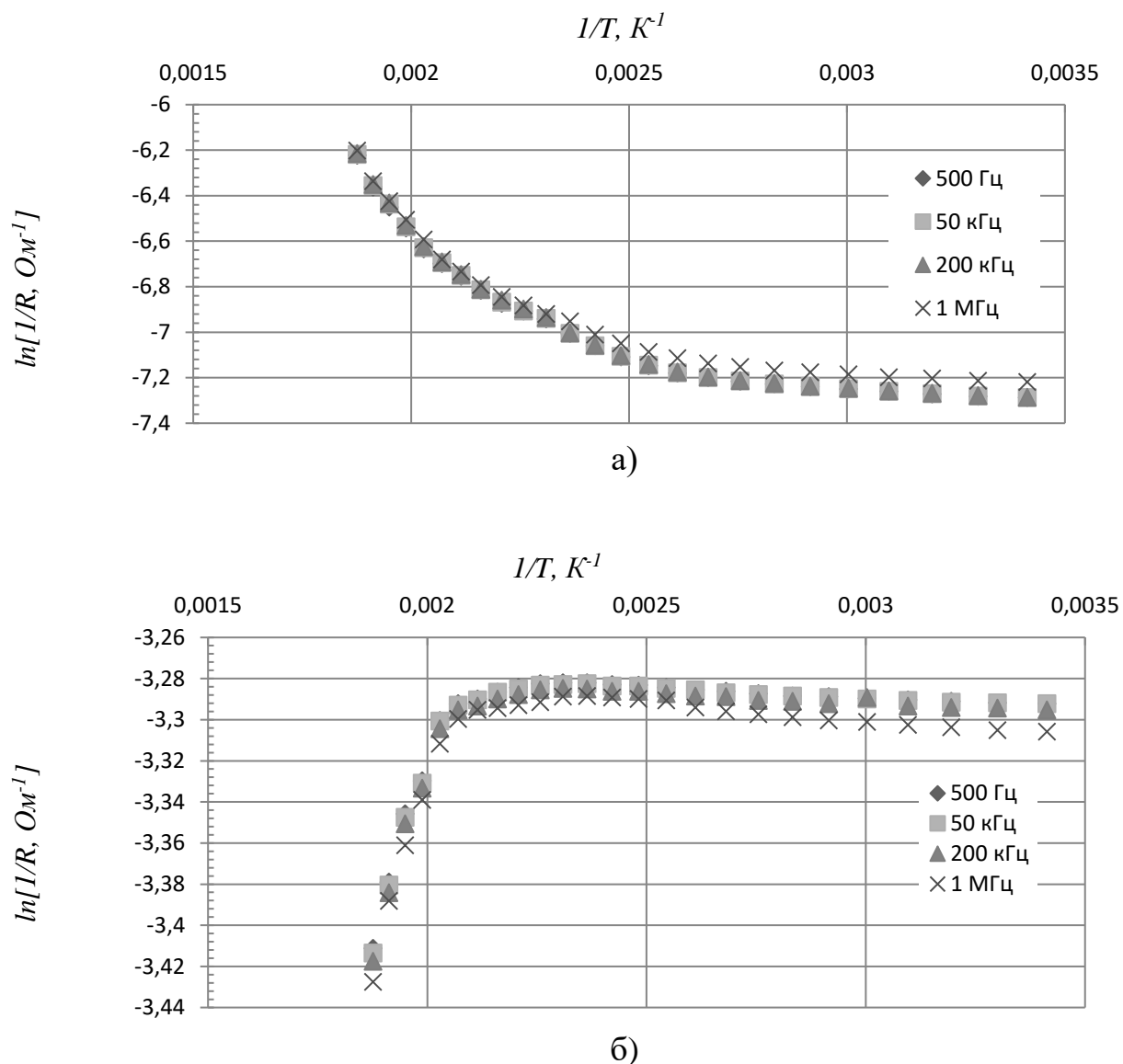
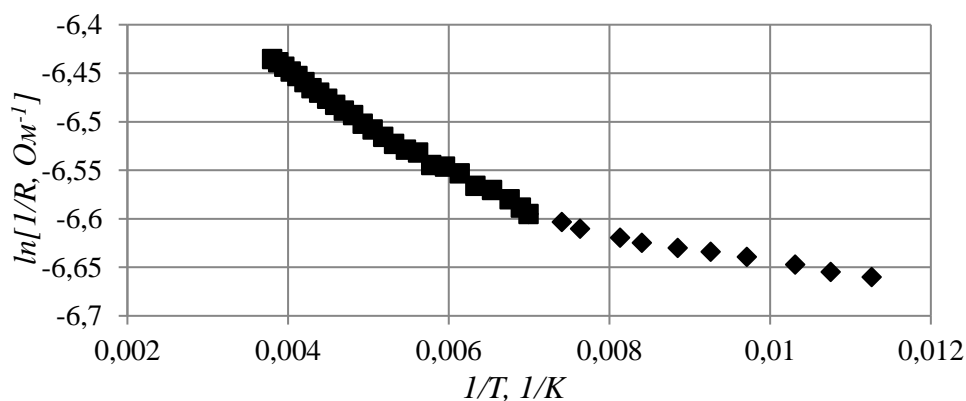
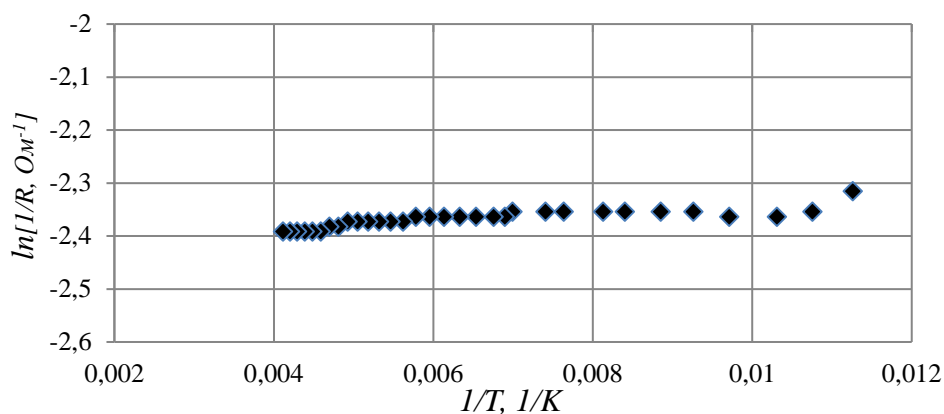


Рисунок 2.13 – Экспериментальные зависимости, характеризующие изменение электропроводности плёнок ИТО, напыленных по технологии №2 без отжига (а) и плёнок ИТО, напыленных по технологии №2 с последующим отжигом (б) при повышенных температурах

Исследование температурной зависимости электропроводности при отрицательных температурах также показало смену механизмов электропроводности плёнок ИТО. На рисунке 2.15 представлены температурные зависимости электропроводности образцов плёнок ИТО с отжигом и без отжига в диапазоне температур от температуры жидкого азота до комнатной.



а



б

Рисунок 2.15 – Экспериментальные зависимости, характеризующие изменение электропроводности плёнок ИТО при пониженных температурах:

а) исходных образцов плёнок, напыленных по технологии №2;

б) образцов плёнок, напыленных по технологии №2 с последующим отжигом

Таким образом, на построенных зависимостях электропроводности исследуемых образцов плёнок ИТО от температуры можно выделить следующие характерные участки, определяющие доминирующие механизмы электропроводности плёнок.

1) В диапазоне температур от 300 до 400 К при увеличении температуры электропроводность обоих образцов монотонно возрастает наиболее вероятно за счет процессов ионизации примесных атомов Sn. Рассчитанные на этом участке значения энергии активации электропроводности для образцов плёнок ИТО,

напыленных без последующего отжига и с проведением высокотемпературного отжига составили 0,0212 эВ и 0,0017 эВ соответственно. Снижение энергии активации электропроводности на порядок после проведения высокотемпературного отжига плёнок указывает на образование в запрещенной зоне материала примесных уровней [108]. Это в свою очередь указывает на то, что в результате проведения высокотемпературного отжига примесь в пленках ИТО становится полностью электрически активной.

2) При дальнейшем увеличении температуры происходит уменьшение электропроводности образцов, напыленных по разработанной технологии №2 с проведением высокотемпературного отжига и снижение энергии активации электропроводности до -0,124 эВ. Это можно связать с истощением примесных уровней, когда концентрация носителей заряда не увеличивается, а подвижность носителей продолжает падать (рисунок 2.14 б). Электропроводность образцов, не подвергавшихся отжигу после напыления, с увеличением температуры выше 400К продолжает возрастать, при этом, рассчитанная энергия активации электропроводности на данном участке возросла на порядок до значения 0,321 эВ (рисунок 2.14 а). Вероятно, это связано с истощением образующихся при синтезе плёнок ИТО примесных уровней, когда концентрация носителей заряда не увеличивается, а подвижность носителей продолжает падать, что указывает на металлический тип электропроводности.

3) Температурные зависимости электропроводности образцов плёнок ИТО с отжигом и без отжига в диапазоне температур от температуры жидкого азота до комнатной также показывает смену механизма электропроводности от полупроводникового к металлическому в результате высокотемпературного отжига. При этом, учитывая результаты, полученные нами в [89], а также результаты, приведенные в [76 – 79, 80, 81] можно утверждать, что пороговой температурой отжига плёнок ИТО, при которой происходит смена механизма электропроводности является диапазон 200-300°C.

4) Зависимость электропроводности от частоты (рисунок 2.13) указывает на возможность наличия дополнительного прыжкового переноса носителей

заряда по уровням локализации за счет электрон-фононного взаимодействия (проводимость Мотта) [108].

Выводы к главе 2

В данной главе приводится разработанная технология осаждения низкоомных оптически прозрачных плёнок ITO с удельным сопротивлением ниже $1 \cdot 10^{-4}$ Ом·см при коэффициенте пропускания на уровне 85 – 90%, а также методики и результаты исследования их электрофизических свойств.

В результате исследования электрофизических свойств плёнок ITO, осажденных по разработанным методикам установлено, что высокотемпературный отжиг плёнок ITO, проводимый после их осаждения, способствует снижению удельного сопротивления плёнок. Снижение удельного сопротивления происходит за счет увеличения концентрации носителей заряда и их подвижности. Таким образом, можно утверждать, что в результате проведения высокотемпературного отжига примесь в пленках ITO полностью становится электрически активной, что приводит к увеличению концентрации электронов проводимости.

Установлена смена механизма электропроводности плёнок ITO от полупроводникового к металлическому при проведении высокотемпературного отжига при температурах выше 250°C . Исследования также показали, что наряду со сменой механизма электропроводности в результате высокотемпературного отжига плёнки ITO представляют из себя вырожденный полупроводник n-типа с положением уровня Ферми выше уровня E_C на 0,09 эВ.

ГЛАВА 3. Осаждение плёнок ИТО методом реактивного магнетронного распыления с устранением радиационного воздействия плазмы магнетронного разряда

Магнетронные распылительные системы широко применяются для нанесения тонких плёнок различного функционального назначения. Отмечается, что в результате ионно-плазменного распыления происходит радиационное воздействие плазмы магнетронного разряда на подложку, что существенно влияет на характеристики напыляемых плёнок. Упомянутое радиационное воздействие плазмы магнетронного разряда на подложку и растущую на ее поверхности плёнку может иметь как позитивное влияние на свойства напыляемых плёнок, обеспечивая более упорядоченный рост плёнок, повышая их плотность, улучшая стехиометрию, так и негативное влияние прежде всего на полупроводниковые гетероструктурные подложки, образуя в их объеме радиационные дефекты [61 - 69]. В связи с проблемой дефектообразования в полупроводниковых гетероэпитаксиальных подложках при формировании на их поверхности тонкопленочных структур ионно-плазменными методами на данный момент существует некоторые ограничения на применения этого метода при изготовлении гетероструктурных приборов микро- и наноэлектроники [39].

Учитывая важность вопроса в развитии технологий микро- и наноэлектроники в данной главе представлены результаты экспериментальных исследований эффективности устранения радиационного воздействия плазмы магнетронного разряда на поверхность подложки и растущей на ее поверхности плёнки при ионно-плазменном распылении. Также представлены результаты исследования влияния уменьшения радиационного воздействия на изменение электрофизических свойств наносимых по разработанной в главе 2 технологии №2 плёнок ИТО. Основные результаты проведенных исследований были опубликованы в работах [109-118].

3.1 Напыление плёнок ИТО с применением магнитной отклоняющей системы

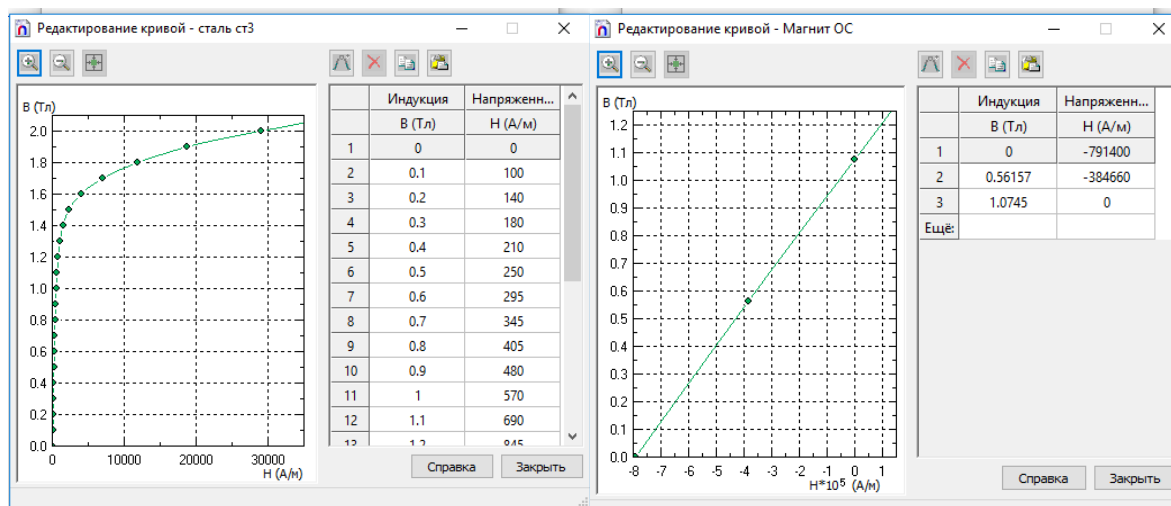
Для проведения данных исследований образцы плёнок ИТО формировались на поверхности диэлектрических (ситалл, кварц) и полупроводниковых кремниевых подложках методом реактивного магнетронного распыления по разработанной в главе 2 технологии №2. Влияние радиационного воздействия плазмы магнетронного разряда на изменение свойств плёнок ИТО исследовалось путем сравнения их свойств при напылении с разработанной магнитной отклоняющей системы и без нее.

3.1.1 Разработка магнитной отклоняющей системы

Анализируя результаты работ различных коллективов, приведенных в разделе 1.2.3, наиболее технологичным представляется метод устранения электроно-ионной бомбардировки при помощи эффекта «магнитного смещения», который может быть реализован в стандартной магнетронной распылительной системе (МРС) планарного типа с одним катодом, если снабдить ее отражающими элементами.

Так, создав между катодом МРС и подложкой магнитное поле, параллельное поверхности катода, оно в процессе напыления будет воздействовать на высокоэнергичные заряженные частицы, силой Лоренца отклоняя их от поверхности подложки, предотвращая ее бомбардировку.

Для определения наиболее оптимальных параметров разрабатываемой магнитной отклоняющей системы (МОС) было произведено предварительное моделирование в программе для расчёта электромагнитных задач методом конечных элементов ELCUT [119]. При моделировании задавались геометрические размеры и характеристики материалов, используемых в МРС (рисунок 3.1).



а

б

Рисунок 3.1 – Задаваемые характеристики материалов МРС для проведения моделирования (а – магнитная проницаемость стали Ст3, б – магнитная проницаемость самарий-кобальтовых постоянных магнитов)

С использованием программы для расчёта электромагнитных задач методом конечных элементов ELCUT были рассчитаны магнитные поля классической магнетронной распылительной системы (рисунок 3.2).

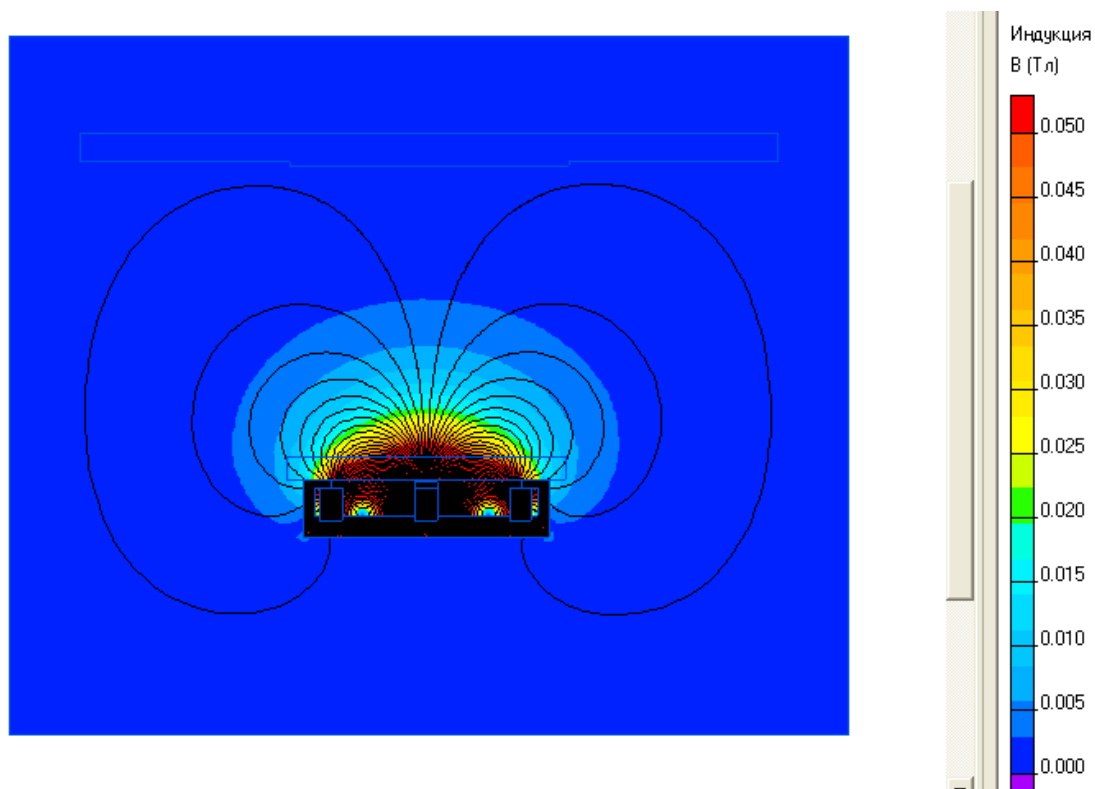


Рисунок 3.2 – Расчёт значений магнитной индукции МРС

Произведенное моделирование показало, что, в следствие сбалансированности магнитного поля МРС, основная часть силовых линий магнитного поля центрального магнита замыкается на полюса противоположенной полярности периферийных магнитов. Однако, как было оговорено в п.1.2.2 электроны и энергичные отрицательные ионы могут достигать подложки.

Для устранения указанной бомбардировки подложки и растущей на ее поверхности пленки отрицательными ионами и электронами предполагается не просто локализовать плазму газового разряда у поверхности мишени, но и создать магнитное поле, вектор напряженности которого направлен ортогонально движущимся к подложке заряженным частицам. При таком расположении вектора напряженности магнитного поля предполагается, что сила Лоренца, действуя на движущиеся заряженные частицы, будет способствовать их отклонению от подложки. С целью обеспечения наиболее близкого к задуманной картине распространения вектора напряженности магнитного поля МОС было проведено моделирование возможных вариантов МОС. Результаты моделирования представлены на рисунке 3.3.

Анализ полученных моделей линии напряженности магнитного поля с учетом применения описанных МОС показал, что наиболее эффективной является планарная МОС с двумя сонаправленными магнитами (рисунок 3.3а). Связано это с тем, что из всех рассмотренных МОС магнитное поле, ортогонально направленное к движущимся на подложку заряженным частицам, обеспечивают только планарные МОС (рисунок 3.3 а и б). При этом планарная МОС с одиночным магнитом (рисунок 3.3б) будет способствовать расширению области плазмы газового разряда и ее смещению в сторону магнита МОС.

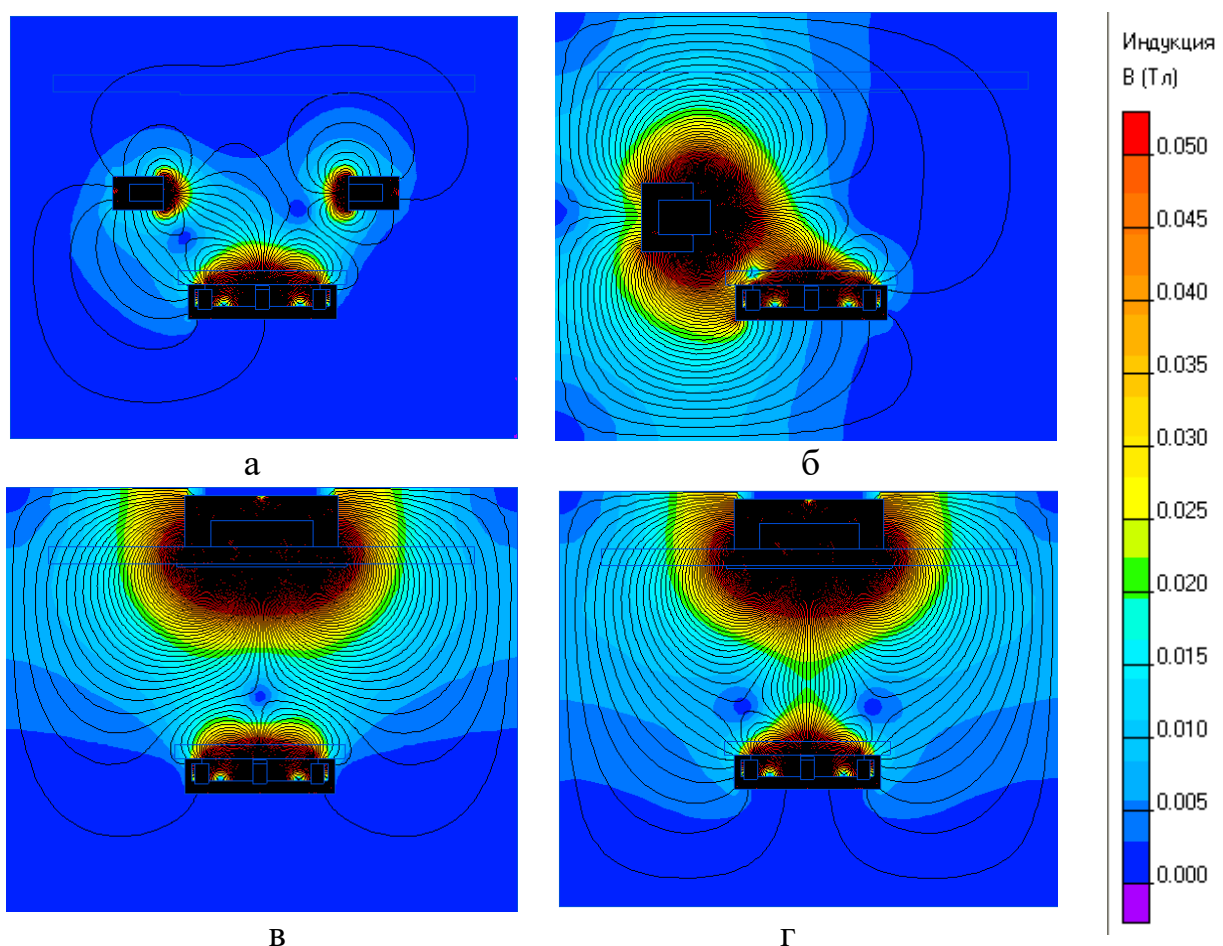


Рисунок 3.3 – Результаты моделирования напряженности магнитного поля в отклоняющих системах различных видов: а – планарная с двумя сонаправленными магнитами, б – планарная с одиночным магнитом, в – вертикальная с магнитом встречно расположенным центральному магниту MPC, г – вертикальная с магнитом попутно расположенным центральному магниту MPC

С целью определения наиболее оптимального соотношения величин магнитной индукции постоянных магнитов, применяемых в MPC и МОС было проведено дальнейшее моделирование МОС с двумя сонаправленными магнитами при разных значениях величин их магнитной индукции. Моделирование производилось при неизменном значении величины магнитной индукции магнитов MPC. Величина магнитной индукции магнитов МОС менялась относительно магнитов MPC в следующих соотношениях (MPC/МОС

соответственно): 1/2; 1/1; 2/1; 4/1. Результаты моделирования представлены на рисунке 3.4.

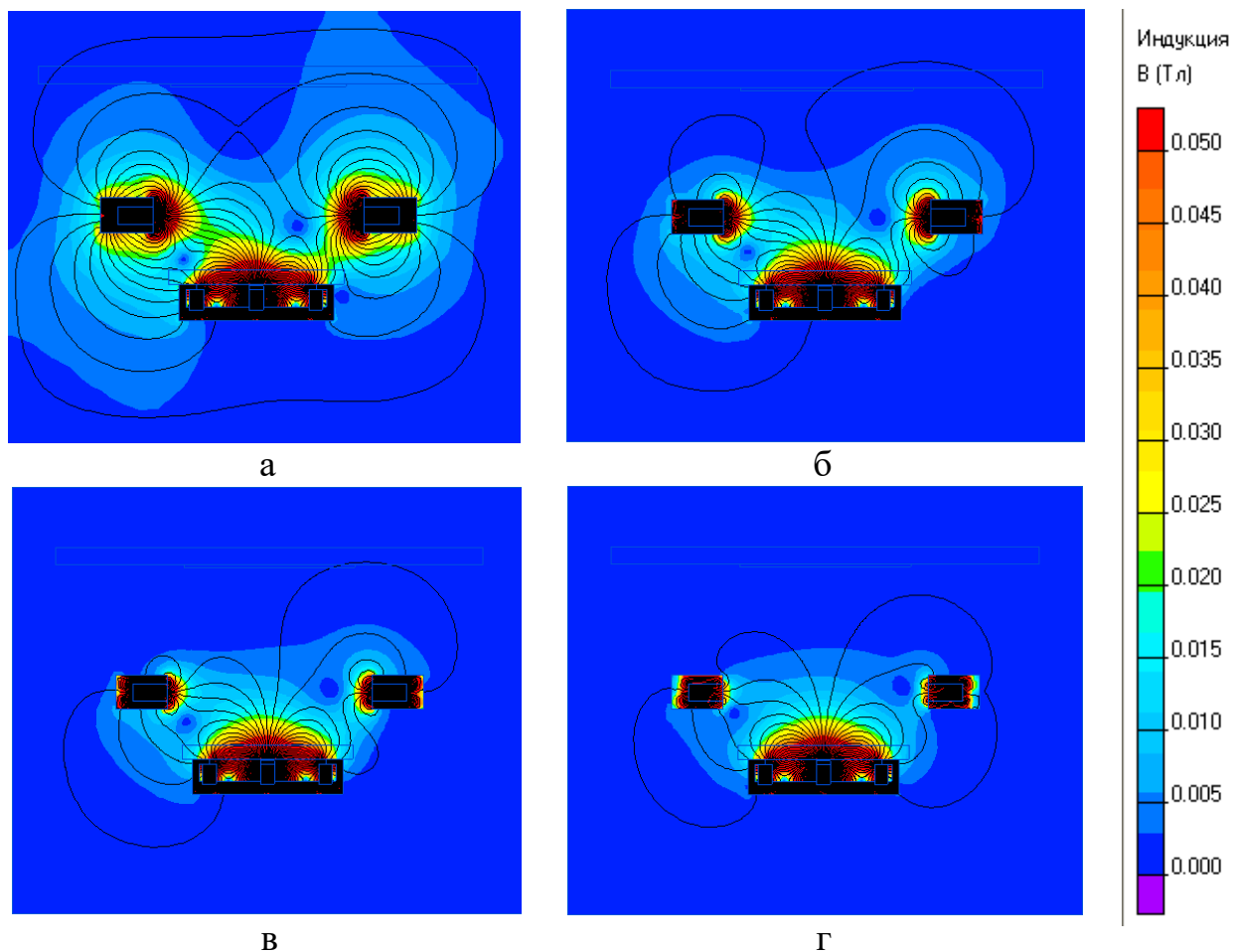


Рисунок 3.4 – Результаты моделирования напряженности магнитного поля в планарной МОС с двумя попутно расположенными магнитами с разным соотношением магнитной индукции постоянных магнитов в МРС и МОС (соответственно): а – 1/2; б – 1/1; в – 2/1; г – 4/1

Результаты моделирования показали, что наиболее оптимальным соотношением величин магнитной индукции постоянных магнитов, применяемых в МРС и МОС является 2 к 1. Такой вывод сделан исходя из того, что при повышении магнитной индукции выше установленного предела магнитное поле МОС в значительной степени влияет на плазму газового разряда, «вытягивая» ее от поверхности мишени. При понижении величины магнитной индукции магнитное поле магнитов МОС практически полностью шунтируется магнитным полем МРС.

С учетом определённых путем моделирования конструкционных параметров МОС, была создана магнитная система, отклоняющая проходящие через нее высокоэнергичные заряженные частицы плазмы газового разряда, выполненная в виде прямоугольного корпуса из стали с закрепленными в нем с двух противоположенных сторон магнитов таким образом, чтобы созданное ими магнитное поле во внутренней части системы было направлено ортогонально движению осаждаемых на поверхность полупроводниковой гетероэпитаксиальной структуры атомов распыляемой мишени [110, 111, 113, 115].

Схематически созданная отклоняющая система представлена на рисунке 3.5. Отклоняющая система 5 размещается между МРС планарного типа 1, включающая в себя магнитную систему 2 и распыляемый катод 3 и подложкой 4, на поверхность которой производится напыление. Отклоняющая магнитная система, выполненная в виде прямоугольного корпуса из стали с закрепленными в нем с двух противоположенных сторон постоянных магнитов 6 внешнее магнитное поле которых замыкается на корпусе системы. Кроме того, постоянные магниты расположены таким образом, чтобы созданное ими магнитное поле во внутренней части системы B_s было однородно по всему промежутку и направлено ортогонально движению осаждаемых на поверхность подложки атомов распыляемого катода. С целью недопущения перегрева постоянных магнитов выше температуры Кюри, реализовано их охлаждение проточной водой. Работа отклоняющей системы осуществляется следующим образом. После подачи постоянного напряжения между катодом 3 МРС 1 и анодом, являющимся держателем подложки 4, на поверхность которой необходимо произвести напыление, в камере зажигается тлеющий разряд. Плазма тлеющего разряда локализуется у поверхности распыляемого катода 3 а рочным магнитным полем B_m , создаваемым постоянными магнитами 2 магнетронной распылительной системы. Электроны двигаются в скрещенных электрическом и магнитном полях над поверхностью катода по сложным циклоидальным траекториям, ионизуя атомы рабочего газа. Образовавшиеся ионы ускоряются в катодном падении

потенциала по направлению к катоду 3 и распыляют его поверхность. Эмитированные при этом вторичные электроны поддерживают горение разряда. Распыленные атомы катода движутся по направлению к поверхности подложки 4, осаждаясь на которую, формируют покрытие. Помимо распыленных атомов катода по направлению к поверхности полупроводниковой гетероэпитаксиальной структуры 4 движутся высокоэнергичные заряженные частицы плазмы газового разряда. Проходя сквозь магнитное поле B_s , сформированное во внутренней части отклоняющей системы, однородное по всему промежутку и направленное ортогонально движению попавших в нее заряженных частиц, последние под действием силы Лоренца отклоняются от поверхности полупроводниковой гетероэпитаксиальной структуры в зависимости от своей массы и заряда.

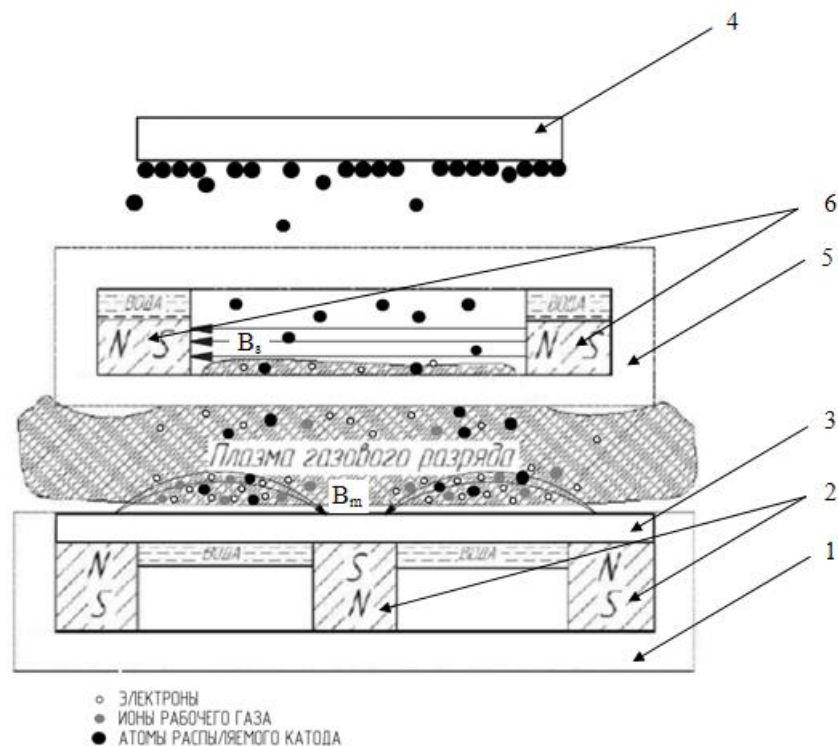


Рисунок 3.5 – Оснащение МРС системой отклонения заряженных частиц от подложки на основе эффекта «магнитного смещения»

Таким образом, предотвращается бомбардировка поверхности подложки высокоэнергетичными частицами плазмы газового разряда и, соответственно,

предотвращается образование в ней радиационных дефектов при напылении покрытий методом магнетронного распыления.

3.1.2 Методика исследования эффективности отвода заряженных частиц от подложки и конденсирующейся на ее поверхности плёнки в процессе магнетронного распыления магнитной отклоняющей системой

Оценка эффективности системы отвода заряженных частиц производилась при напылении низкоомных оптически прозрачных электропроводящих плёнок ИТО на ситалловые подложки магнетронной распылительной системой планарного типа с величиной магнитного поля на поверхности распыляемого катода $B_m=0,25$ Тл и плотности ионного тока на мишени 14 мА/см².

Уменьшение влияния плазмы газового разряда осуществлялось путем подачи отрицательного потенциала -100 В на подложку относительно анода во время напыления (рисунок 3.6 а), использованием МОС, разработанной в п. 3.1.1 (рисунок 3.6 б), а также комбинацией этих методов (рисунок 3.6 в).

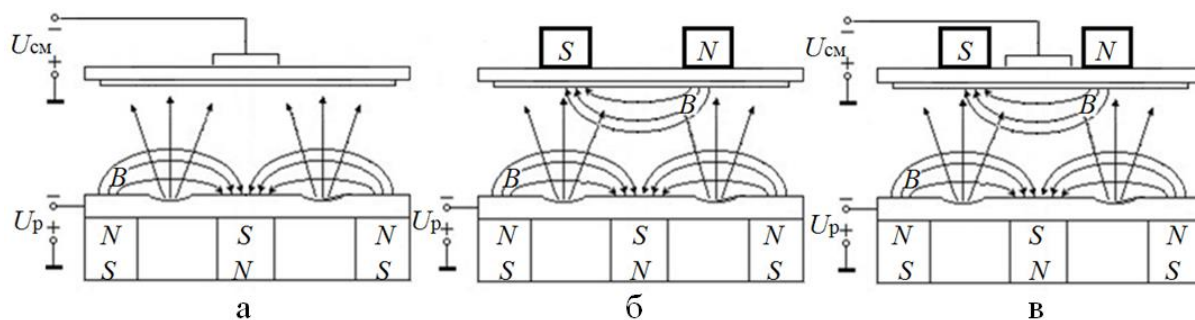


Рисунок 3.6 – Методы уменьшения влияния плазмы газового разряда на подложку и растущую пленку при магнетронном распылении

Измерение параметров плазмы газового разряда производилось следующим образом. Вблизи подложки был установлен одиночный ленгмюровский зонд (рисунок 3.7 а), с помощью которого измерялась зондовая ВАХ плазменного разряда. Перестраивая ее в полулогарифмическом масштабе (рисунок 3.7 б) и пользуясь выражением, связывающим температуру электронов и угловой

коэффициент наклона прямой, аппроксимирующей участок зависимости логарифма электронного тока от потенциала (CD) [120], можно вычислить температуру электронов:

$$T = \frac{e}{k} \left[\frac{\partial \ln I_3}{\partial U} \right]^{-1}, \quad (3.1)$$

где e – заряд электрона; k – постоянная Больцмана.

Зная температуру электронов, легко определить концентрацию заряженных частиц [120]:

$$n_0 = 4 \cdot \frac{I_{e0}}{e \cdot S \cdot \sqrt{\frac{8kT}{\pi \cdot m}}}, \quad (3.2)$$

где I_{e0} – значение электронного тока на зонде при отсутствии на нем задерживающего потенциала; S – площадь поверхности зонда, введенной в плазму.

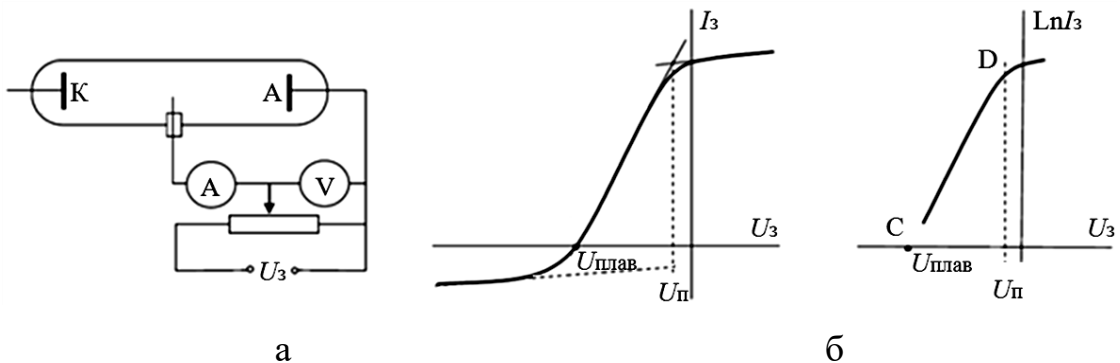


Рисунок 3.7 – Схема зондовых измерений (a) и зондовая вольт-амперная характеристика ($б$) в линейном (слева) и полулогарифмическом (с права) масштабах

Таким образом, сравнивая рассчитанные значения температуры электронов и их концентрации при применении указанных методов уменьшения электронно-ионной бомбардировки можно говорить об эффективности того или иного метода.

Следует сказать, что поскольку параметры плазмы измерялись в скрещенных электрических и магнитных полях, то вычисленные значения носят исключительно сравнительный характер.

3.1.3 Исследование эффективности уменьшения радиационного воздействия плазмы магнетронного разряда на подложку и растущую плёнку

По разработанной и описанной в главе 2 технологии напыления плёнок ИТО №2 были напылены образцы плёнок ИТО с использованием сконструированной магнитной отводящей системой, и без нее [110]. Разница состояла в применении того или иного из вышеописанных методов уменьшения влияния плазменного разряда на растущую пленку или применении их комбинации. Эффективность метода отвода заряженных частиц определялась путем измерения во время напыления зондовой ВАХ. Ее обработка по вышеописанной методике позволила вычислить основные параметры плазмы, которые занесены в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты экспериментов по влиянию плазмы на растущую пленку

Метод влияния на плазму	Температура электронов, К	Концентрация плазмы, м^{-3}	Параметры плёнки
Отсутствует	59763	$5,95 \cdot 10^{12}$	$\rho_s = 12,8 \text{ Ом}/\square$ $d = 130 \text{ нм}$
Подача напряжения на подложку –100 В	50877	$5,94 \cdot 10^{12}$	$\rho_s = 19 \text{ Ом}/\square$ $d = 130 \text{ нм}$
Использование магнитной ловушки	16738	$4,5 \cdot 10^{11}$	$\rho_s = 74 \text{ Ом}/\square$ $d = 95 \text{ нм}$
Комбинация обоих методов и увеличение времени напыления в 2 раза	11164	$4,47 \cdot 10^{11}$	$\rho_s = 60 \text{ Ом}/\square$ $d = 170 \text{ нм}$

Из данных таблицы 3.1 видно, что подача отрицательного потенциала на подложку дало лишь небольшое снижение энергии электронов, не влияя на концентрацию заряженных частиц в плазме. Наиболее эффективным методом уменьшения влияния плазмы газового разряда на подложку и растущую пленку оказалась устранение электронно-ионной бомбардировки магнитной отводящей системой. Это дало уменьшение энергии электронов, достигающих подложки более

чем в 3,5 раза, однако их концентрация в этой области уменьшилась всего на порядок.

В ходе экспериментов установлено, что уменьшение влияния плазмы газового разряда на растущую пленку вызвало уменьшение скорости роста и увеличение сопротивления. При более детальном изучении поверхностей плёнок было замечено, что полученные плёнки с низким поверхностным сопротивлением, напыленные без отвода плазмы от подложки, обладают ровной однородной структурой (рисунок 3.8 а) в то время как на пленках, напыленных с применением отводящей системы, обнаружены ярко выраженные трещины (рисунок 3.8 б), которые, являясь дефектами плёнок, несомненно, увеличили их поверхностное сопротивление.

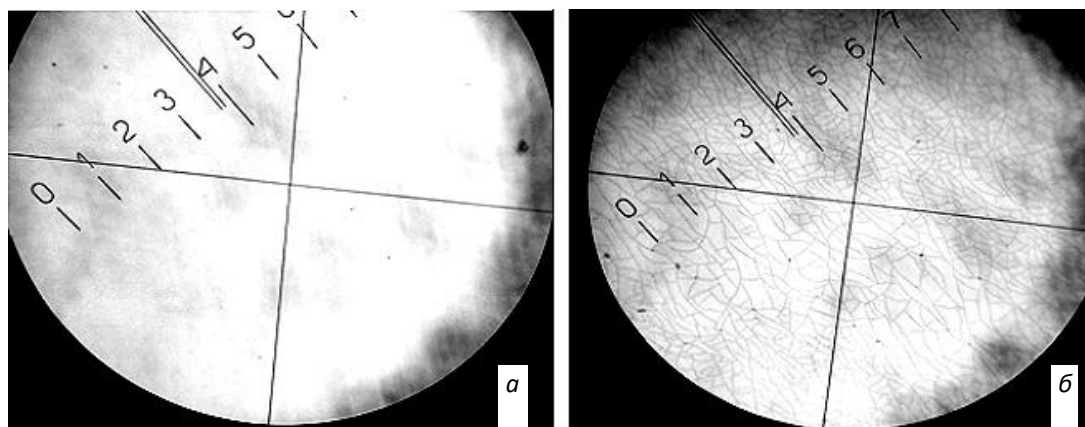


Рисунок 3.8 – Поверхности полученных образцов ITO-плёнок

Растрескивание плёнки при ее напылении с применением МОС, вероятно, обусловлено тем, что, отводя высокэнергетичные электроны от подложки, которые ее разогревали, была значительно снижена температура подложки во время напыления. Измерения температуры подложки при отклонении плазмы газового разряда от подложки показали ее снижение на 100–120°C. В результате в растущей пленке возникают сильные механические напряжения.

Устранить данное явление позволил нагрев подложки непосредственно во время напыления индивидуальным нагревателем. Для этого был изготовлен фотонный нагреватель, нагревательным элементом в котором явились галогенные лампы общей мощностью 200 Вт (рисунок 3.9).

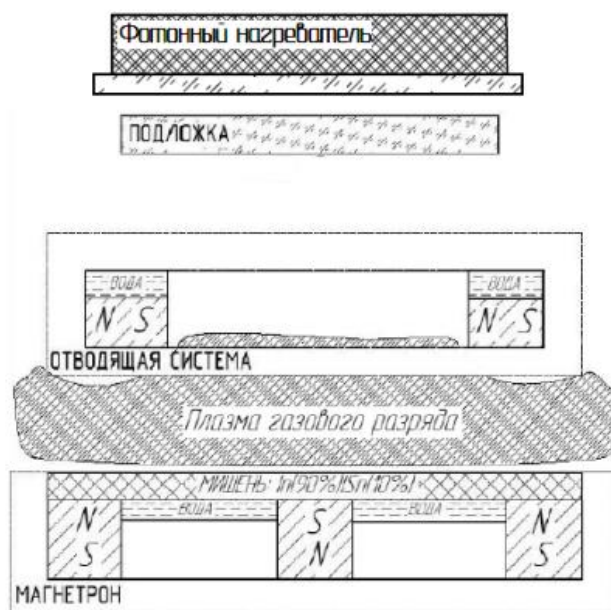


Рисунок 3.9 – Разработанное оснащение магнетронной распылительной системы

Фотонный нагреватель позволил поддерживать температуру подложки во время напыления на уровне 200°C , что необходимо для получения кристаллитов больших размеров в ИТО-пленке. При таком поддержании температуры рост плёнки происходит без образования дефектов, что явилось причиной снижения ее поверхностного сопротивления в среднем до $18 \text{ Ом}/\square$.

3.2 Свойства плёнок ИТО, напыленных методом реактивного магнетронного распыления с уменьшением радиационного воздействия плазмы магнетронного разряда

Не смотря на очевидное негативное воздействие электронно-ионной бомбардировки поверхности гетероэпитаксиальных полупроводниковых подложек, выраженное в их последующей деградации, многими исследовательскими коллективами отмечается, что при напылении тонкопленочных покрытий бомбардировка заряженными частицами способствует формированию более совершенной кристалличности растущих плёнок что ведет к улучшению их свойств. С целью исследования влияния электронно-ионной

бомбардировки на изменение электрофизических свойств наносимых плёнок ИТО производилось исследование свойств плёнок ИТО, напыленных с применением магнитной отклоняющей системы.

Первым и основным параметром, характеризующим электрические свойства плёнок ИТО является удельное поверхностное сопротивление. При отработке технологии нанесения плёнок ИТО методом реактивного магнетронного распыления с устранением ее электронно-ионной бомбардировки было установлено, что в результате такого напыления получаемое поверхностное сопротивление плёнок ИТО увеличивается при одинаковой толщине плёнок. С целью выяснения причин увеличения поверхностного сопротивления плёнок ИТО при напылении с устранением электронно-ионной бомбардировки производились холловские измерения характеристик носителей заряда исследуемых образцов при толщине плёнок 130 нм, результаты которых приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Электрофизические характеристики плёнок ИТО, напыленных по технологии № 2 с применением и без применения магнитной отклоняющей системы

Параметры плёнок ИТО	Напыления плёнок ИТО без отклоняющей системы	Напыления плёнок ИТО с отклоняющей системы
$\rho_V, \text{ Ом}\cdot\text{см}$	$1,66 \cdot 10^{-4}$	$2,34 \cdot 10^{-4}$
$n, \text{ см}^{-3}$	$6,51 \cdot 10^{20}$	$4,86 \cdot 10^{20}$
$\mu, \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$	57,7	55

Анализ измеренных параметров носителей зарядов в пленках ИТО, напыленных в одинаковых технологических режимах с применением и без применения магнитной отклоняющей системы указывают на то, что электронно-ионная бомбардировка действительно благоприятно влияет на электрофизические характеристики плёнок ИТО. При этом, наиболее существенно изменяется концентрация носителей заряда. Уменьшение концентрации носителей заряда в пленках ИТО, напыленных с магнитной отклоняющей системой, по всей видимости является следствием того, что как было установлено в [114] при

ионно-плазменном распылении металлических мишеней в среде активных газов образование конечных соединений (в данном случае $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$) происходит именно на подложке, когда поступают атомы и ионы металлов, а также молекулы и ионы газа рабочей атмосферы. Таким образом электронно-ионная бомбардировка подложки и растущей на ее поверхности плёнки способствует образованию плёнок именно стехиометрических соединений. Устранение электронно-ионной бомбардировки приводит к нарушению условий образования стехиометрических соединений [56-60].

Что касается подвижности носителей заряда, то изменение этого параметра происходит незначительно. Связано это с тем, что после напыления образцы обоих типов подвергались высокотемпературному отжигу в азоте (600°C в течении 20 минут). На неизменность подвижности носителей заряда указывает и снятая рентгенограмма образцов плёнок ИТО, напыленных как с устранением ее электронно-ионной бомбардировки, так и без нее (рисунок 3.10).

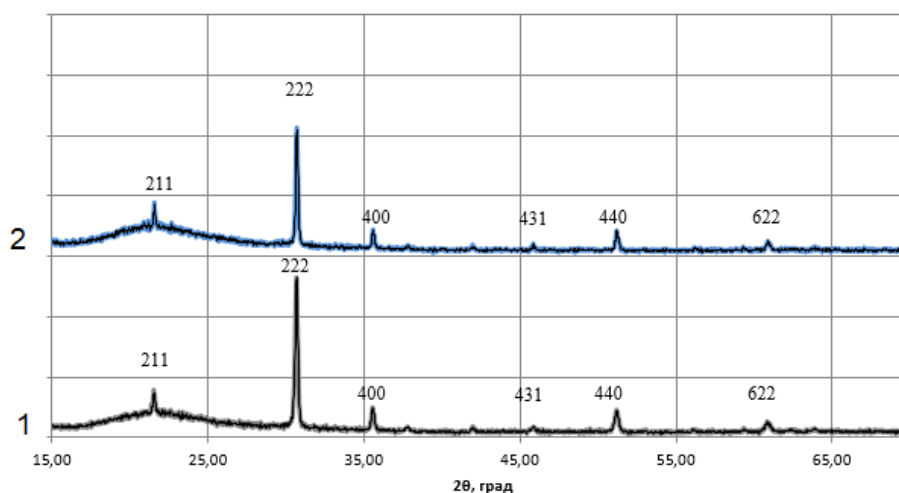


Рисунок 3.10 – Рентгенограмма плёнок ИТО:

- 1 – плёнки ИТО, напыленные без применения отклоняющей системы;
- 2 – плёнки ИТО, напыленные с применением отклоняющей системы

Приведенные рентгенограммы плёнок ИТО показывают, что оба образца плёнок содержат кристаллические фазы с идентичными ориентациями плоскостей отражения. Однако, характерным для плёнок ИТО, напыленных в условиях

устранения электронно-ионной бомбардировки, является более низкая интенсивность пиков ориентаций плоскостей направления. Это указывает на то, что в результате напыления плёнок ИТО без применения магнитной отклоняющей системы происходит более интенсивный нагрев подложки, который заранее способствует формированию более выраженной кристалличности плёнок.

При исследовании возможных изменений в механизме электропроводности плёнок ИТО, напыленных как с устранением электронно-ионной бомбардировки так и без нее были сняты температурные зависимости их сопротивления (рисунок 3.11).

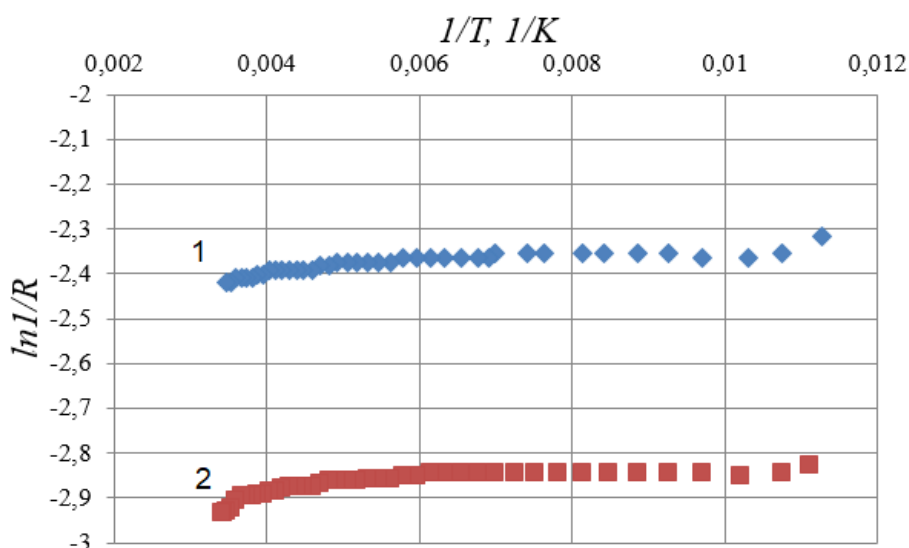


Рисунок 3.11 – Температурные зависимости электропроводности плёнок ИТО:

- 1 – плёнки ИТО, напыленные без применения отклоняющей системы;
- 2 – плёнки ИТО, напыленные с применением отклоняющей системы

Исследование температурных зависимостей электропроводности плёнок ИТО, напыленных с применением отклоняющей системы и без нее, показало их идентичное поведение, что говорит о неизменности механизмов электропроводности.

Выводы к главе 3

В результате исследования процесса осаждения плёнок ITO методом реактивного магнетронного распыления с устранением радиационного воздействия на подложку были получены следующие результаты.

Предложена и защищена патентом РФ [115] магнитная система, размещаемая между магнетронной распылительной системой и подложкой и отклоняющая пролетающие через нее заряженные частицы плазмы газового разряда. Применение указанной отклоняющей системы позволило уменьшить концентрацию заряженных частиц более чем в 13,2 раз и отвести от подложки высокоэнергетические электроны.

Электрофизические характеристики плёнок ITO, напыленных в условиях отклонения заряженных частиц показали некоторое снижение концентрации носителей заряда, вследствие чего в полтора раза возросло удельное поверхностное сопротивление. Показано, что рост удельного сопротивления связан с устранением бомбардировки растущей плёнки заряженными частицами. Однако, не смотря на увеличение удельного поверхностного сопротивления плёнок ITO, остальные электрофизические характеристики (механизмы электропроводности, прозрачность, фазовый состав) остаются практически неизменными. Учитывая, что конечное сопротивление плёнок ITO, напыленных с применением магнитной отклоняющей системы, остается на достаточно низком уровне, данные плёнки ITO остаются пригодными для применения в оптоэлектронных полупроводниковых приборах наноэлектроники, оптоэлектроники и радиофотоники.

ГЛАВА 4. Применение плёнок ITO в оптоэлектронных приборах

Данная глава посвящена исследованиям практического применения плёнок ITO, напыляемых по разработанной и описанной в главе 2 технологии.

В разделе 1.2.3 приведены примеры практического применения плёнок ITO различными коллективами при производстве оптоэлектронных полупроводниковых приборов. При этом отмечено, что в результате проводимых исследований многие коллективы столкнулись с проблемой высокого контактного сопротивления ITO/полупроводник.

Учитывая результаты, полученные в главе 3, показывающие, что применение магнитной отклоняющей системы позволило значительно уменьшить электронно-ионную бомбардировку подложки и растущей плёнки в данной главе приводятся результаты исследования применения плёнок ITO, напыленных по разработанной технологии №2, в качестве оптически прозрачного омического контакта и антиотражающего покрытия к полупроводниковым структурам.

Основные результаты проведенных исследований были опубликованы в работах [121-134].

4.1 Применение плёнок ITO в качестве прозрачного проводящего контакта для электрооптических модуляторов на основе гетероэпитаксиальных структур InP

Одним из основных направлений развития современных систем связи является улучшение качества и увеличение скорости передаваемой информации на значительные расстояния с минимальными искажениями, а также с постепенным снижением удельной стоимости телекоммуникационного оборудования [135]. Совокупность этих задач вызывает большой интерес разработчиков и производителей систем телекоммуникации к волоконно-оптическим линиям связи.

Структура волоконно-оптических линий связи в общем виде представляет собой четыре основных элемента: модуль оптического излучения, модуль передачи сигнала, модули кодировки и детектирования (преобразования) оптического сигнала [136]. При этом основным элементом, определяющим быстродействие волоконно-оптической линии связи, является модуль кодирования оптического сигнала.

Модуль кодирования сигнала для рассматриваемых линий связи может реализовываться как непосредственно в лазере по принципу прямой модуляции сигнала, так и отдельным элементом - электрооптическим модулятором (ЭОМ), производя внешнюю модуляцию сигнала управляющим СВЧ сигналом [137]. Наиболее распространенной конструкцией внешнего ЭОМ является модулятор Маха-Цендера (рисунок 4.1).

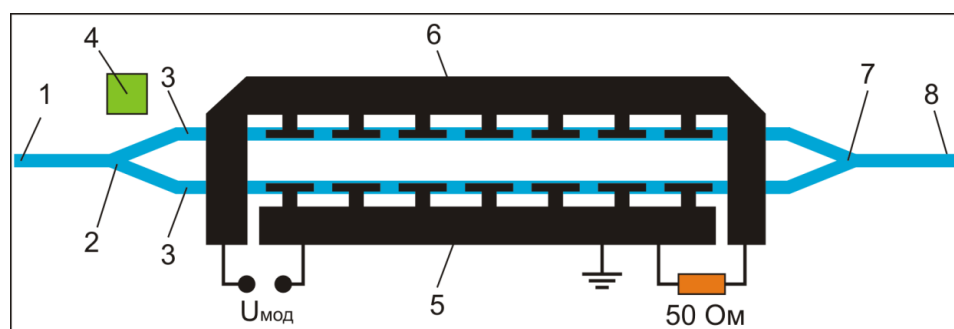


Рисунок 4.1 – Схематичное изображение модулятора Маха-Цендера на основе квантово-размерного эффекта Штарка: 1 – вход модулятора, 2 – Y-разветвитель, 3 – каналы интерферометра, 4 – электрод смещения (n-контакт), 5, 6 – управляющие электроды (p-контакт), 7 – Y-соединитель, 8 – выход модулятора

Модуляция оптического излучения ЭОМ может быть реализована на основе различных эффектов, однако одним из наиболее перспективных для практического применения является модулятор функционирующий на основе квантоворазмерного эффекта Штарка. Эффект Штарка наблюдается в полупроводниковых гетероструктурах и выражается в смещении спектра поглощения или испускания гетероструктурой квантов излучения при воздействии электрического поля. В отсутствие внешнего электрического поля,

электроны и дырки занимают в квантовых ямах полупроводниковой гетероструктуры дискретный набор энергетических уровней. Следовательно, системой могут быть поглощены или испущены только кванты света с дискретным набором значений энергии. При воздействии внешнего электрического поля, электронные уровни сдвигаются к более низким значениям энергии, а дырочные уровни к более высоким. Это, в свою очередь, ведет к уменьшению энергии поглощаемых или испускаемых структурой квантов света (рисунок 4.2). Помимо этого, возникающий наклон валентной зоны и зоны проводимости при воздействии внешнего электрического поля, ведёт к пространственному разделению зарядов, что вызывает уменьшение интеграла перекрытия, и ведёт к уменьшению коэффициента поглощения/испускания системой квантов света [138].

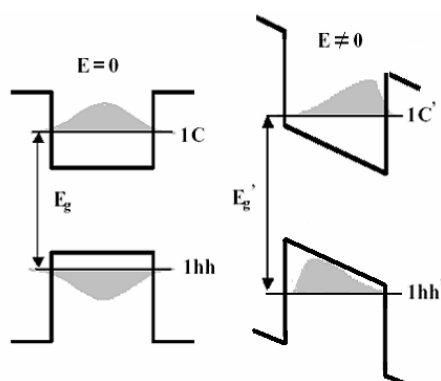


Рисунок 4.2 – Демонстрация возникновения эффекта Штарка в квантовой яме

Конструкция гетероэпитаксиальной структуры (гетероструктуры) ЭОМ определяет диапазон рабочих длин волн и в первую очередь влияет на значения напряжения полуволнового смещения и уровень оптических потерь. В общем случае, для реализации электрооптического модулятора, гетероструктура представляет собой pin-диодную структуру, выращенную на полуизолирующей подложке (100) InP. Такая структура позволяет эффективно управлять коэффициентом преломления при меньших значениях напряженности электрического поля, в сравнении с другими типами структур [139]. На подложках методами эпитаксии выращивают активный слой с заданным

коэффициентом преломления, ограниченный снизу и сверху слоями, изготовленными из материалов, имеющих меньший коэффициент преломления. Прохождение световой волны в слое с высоким коэффициентом преломления основано на эффекте полного отражения от границ слоя с слоями-оболочками (рисунок 4.3). На рисунке 4.4 приведен пример строения pin-диодной структуры ЭОМ с обозначенным путем световой волны в сечении активного слоя [140].

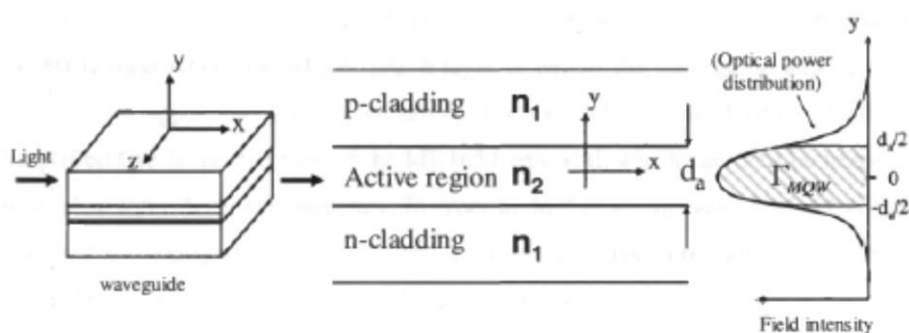


Рисунок 4.3 – Схематичное изображение полупроводникового оптического волновода

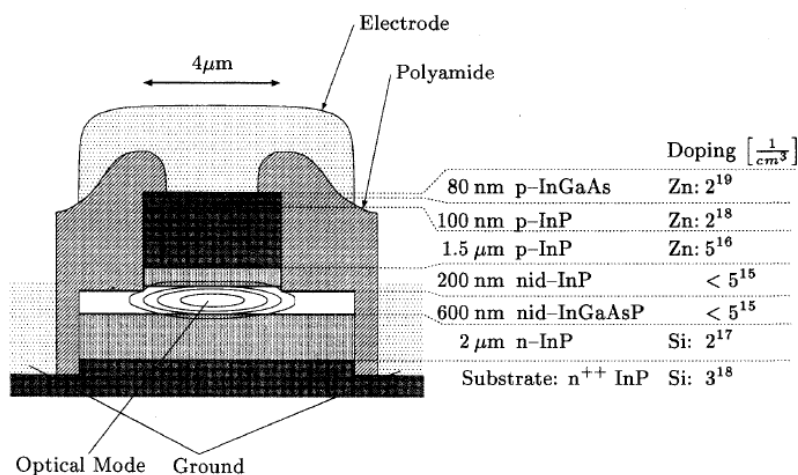


Рисунок 4.4 – Строение pin-диодной структуры для реализации ЭОМ

Модуляторы на основе эффекта Штарка легко интегрируются как в СВЧ так и в цифровую электронику. Недостатком таких ЭОМ является их сложность изготовления, а следовательно, и стоимость [141]. В связи с большими перспективами применения плёнок ITO в устройствах оптоэлектроники в качестве прозрачного проводящего контакта вопрос исследования контакта ITO/p-

InGaAs является довольно актуальным. Перспективы исследования контакта ИТО/*p*-InGaAs вызвано следующим. Во-первых, такой контакт, позволяет использовать технику самосовмещения при формировании интегральных волноводных *p**n*-диодов. Формирование самосовмещенного омического контакта относительно *p**n*-диода улучшает его характеристики и обеспечивает наилучшую однородность параметров по площади пластины. Техника самосовмещения позволяет делать более узкие волноводы, так как не требуется делать допуски на совмещение омического контакта с волноводом, а также позволяет избежать технологически возникающих паразитных емкостей образуемых в обычных случаях краями омического контакта и подложкой. Второе преимущество исследования контакта ИТО/*p*-InGaAs связано с возможностью формирования омических оптически прозрачных контактов для ЭОМ. В-третьих, в связи с заменой драгоценных металлов, традиционно используемых в составе многослойных омических контактов, несомненно, такая замена целесообразна с экономической точки зрения.

4.1.1 Методика измерения контактного сопротивления ИТО/*p*-InGaAs

Для измерения контактного сопротивления ИТО/*p*-InGaAs использовалась широко применяемая резистивная модель, изображенная на рисунке 4.5 [142].

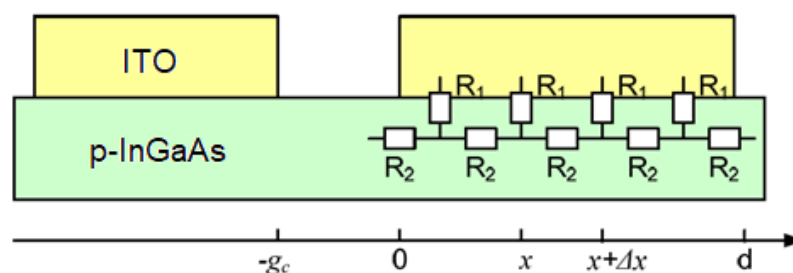


Рисунок 4.5 – Резистивная модель контакта ИТО/*p*-InGaAs

Эквивалентная схема, представленная на рисунке 4.5, вычисляется путем разбиения структуры на небольшие участки длиной Δx , так что для каждой

отдельной секции контактное сопротивление R_1 и полупроводниковое сопротивление R_2 рассчитывается по формуле (4.1):

$$R_1 = \frac{\rho_c}{w_c \cdot \Delta x} \quad \text{и} \quad R_2 = R_{sh} \frac{\Delta x}{w_c}, \quad (4.1)$$

где ρ_c – контактное сопротивление металл-полупроводник, Ом см²;

R_{sh} – удельное сопротивления полупроводника, Ом/ квадрат;

w_c – ширина контакта.

После всех преобразований полное сопротивление между двумя контактными площадками, расположенными на некотором расстоянии друг от друга, определяется по формуле (4.2):

$$R = 2 \cdot \frac{\sqrt{\rho_c \cdot R_{sh}}}{w_c} + R_{sh} \cdot \frac{g_c}{w_c}, \quad (4.2)$$

где g_c – расстояние между двумя контактами, рисунок 4.6 а.

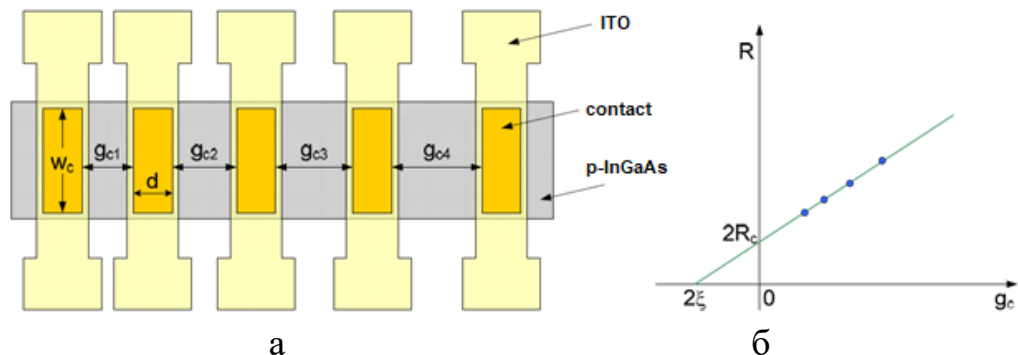


Рисунок 4.6 – Схематическое изображение тестовой TLM структуры (а) и ожидаемая зависимость сопротивления от расстояния между контактами (б)

Таким образом, после измерения тестовой структуры - TLM изображенной на рисунке 4.6 а и построения зависимости $R=f(g_s)$, ожидаемый вид которой изображен на рисунке 4.6 б, можно определить удельное контактное сопротивление ITO/p-InGaAs и слоевое сопротивление полупроводника [142]. Измерения контактного сопротивления ITO/p-InGaAs проводились с использованием зондовой станции Suss PM5 и измерителя сопротивления Tektronix 370A.

4.1.2 Исследование омических характеристик контакта ITO/*p*-InGaAs

Исследование омических характеристик контактов ITO/*p*-InGaAs производилось путем измерения их вольтамперных характеристик (ВАХ) и контактного сопротивления. Также проводилось сравнение этих параметров с традиционно используемой многослойной структурой, Ti/Pt/Au с толщинами слоев 50/25/400 нм, соответственно, напыленной электронно-лучевым испарением и которая после высокотемпературного вжигания образует омический контакт к высоколегированным слоям *p*-типа проводимости полупроводников группы A³B⁵. Плёнки ITO напылялись методом реактивного магнетронного распыления по технологии №2, отработанной в п. 2.3 (распыление металлической мишени In/Sn в атмосфере O₂(29%)/Ar(71%) в течении 10 минут при токе разряда 0,3 А). На рисунке 4.7 представлены измеренные ВАХ исследуемых контактов, не подвергавшихся высокотемпературному отжигу. Измерение ВАХ производилось при помощи измерителя характеристик полупроводниковых приборов Л2-56.

Анализ полученных ВАХ (рисунок 4.7) показал, что контакт ITO/*p*-InGaAs уже без отжига имеет симметричную относительно начала координат ВАХ, близкую к линейной. После проведения высокотемпературного отжига контакта ITO/*p*-InGaAs ВАХ становится линейной и контактное сопротивление уменьшается. Однако в целом контактное сопротивление ITO/*p*-InGaAs остается достаточно значительно выше контактного сопротивления Ti/Pt/Au/*p*-InGaAs, что по всей видимости связано с большим сопротивлением самой плёнки ITO по сравнению с металлизацией.

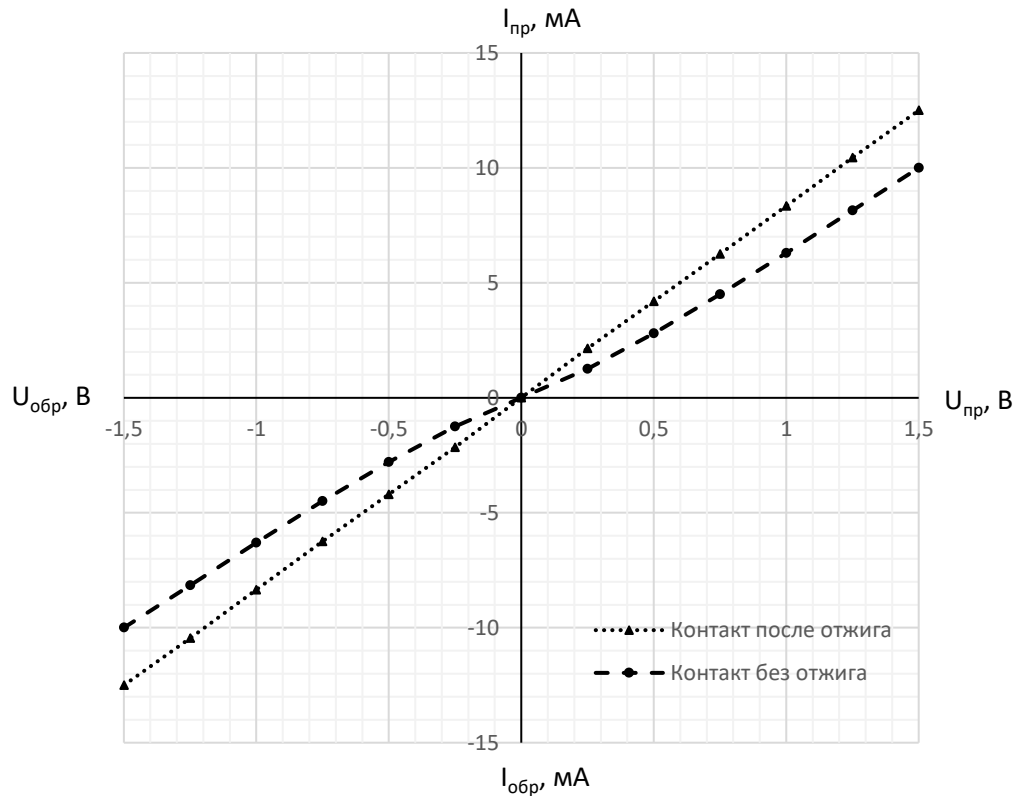


Рисунок 4.7 – Вольтамперные характеристики контакта ITO/p-InGaAs до и после высокотемпературного отжига

Для объяснения получения омической ВАХ контакта ITO/p-InGaAs с учетом параметров обоих материалов, а также с учетом того, что после отжига плёнки ITO является вырожденным и в целом обладают свойствами металла построена его зонная энергетическая диаграмма (рисунок 4.8).

Оценка построенной зонной энергетической диаграммы показывает, что в следствии высокой степени легирования обоих контактных материалов (параметры слоя InGaAs приведены на рисунке 4.4) барьер получился достаточно тонким, единицы нанометров, поэтому можно говорить о туннельном механизме переноса. Подобный механизм токопереноса используется для формирования несплавного омического контакта к p^{++} -GaAs или p^{++} -InGaAs [143].

Исследование непосредственно контактного сопротивления производилось методом TLM по методике, описанной в п. 4.1.2. При этом, для установления влияния температуры отжига контактных слоев на изменение контактного

сопротивления исследуемые образцы подвергались высокотемпературному отжигу в течении 10 минут при различных температурах. Результаты исследования контактного сопротивления представлены в таблице 4.1.

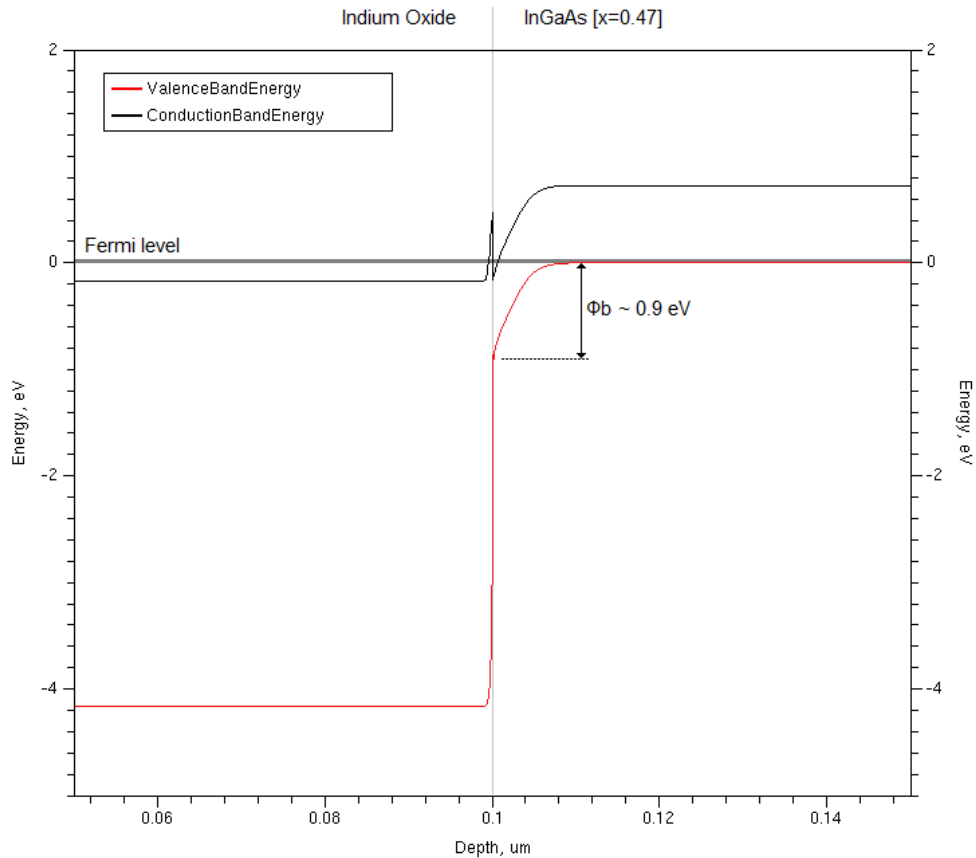


Рисунок 4.8 – Зонная энергетическая диаграмма контакта ИТО/*p*-InGaAs

Анализ полученных значений контактного сопротивления ИТО/*p*-InGaAs показывает их допустимость в качестве омических контактов полупроводниковых оптоэлектронных приборов на основе InP/InGaAs гетероструктур. При этом, наименьшим контактным сопротивлением обладают контакты ИТО/*p*-InGaAs, полученные при температуре отжига 300°C, плёнки ИТО в которых напылены без отклоняющей системы. Это обусловлено тем, что как было показано в разделе 3.3 плёнки ИТО, напыленные без применения магнитной отклоняющей системы обладают в полтора раза меньшим удельным сопротивлением, нежели при напылении с применением отклоняющей системы. Именно увеличение удельного

сопротивления плёнок ИТО и является причиной пропорционального увеличения контактного сопротивления ИТО/*p*-InGaAs.

Таблица 4.1 – Контактное сопротивление исследуемых образцов при различной температуре отжига

Температура отжига контакта, °С	Контактное сопротивление, Ом·см ²		
	Ti/Pt/Au/ <i>p</i> -InGaAs	ИТО/ <i>p</i> -InGaAs (напыление ИТО без отклоняющей системы)	ИТО/ <i>p</i> -InGaAs (напыление ИТО с отклоняющей системой)
300	$5,75 \cdot 10^{-6}$	$5,46 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$
350	$5,84 \cdot 10^{-6}$	$8,60 \cdot 10^{-5}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$
400	$6,90 \cdot 10^{-6}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$

Следует отметить, что при напылении плёнок ИТО с применением магнитной отклоняющей системы контактное сопротивление ИТО/*p*-InGaAs является более стабильным. Это вероятно связано с менее нарушенной границей раздела ИТО/полупроводник.

4.1.3 Разработка технологического маршрута изготовления электрооптического модулятора в бескорпусном исполнении с омическим самосовмещенным контактом ИТО/*p*-InGaAs

Полученные результаты исследования характеристик омического контакта ИТО/*p*-InGaAs, а также результаты отработки технологии плазмохимического травления InP/InGaAs гетероструктуры в индуктивно-связанной плазме Cl₂/Ar/N₂ для формирования оптических волноводных структур [121, 122] позволили разработать технологический маршрут изготовления электрооптических модуляторов, топологии которых были разработаны нами и представлены в [133, 134], функционирующие на основе эффекта Штарка, с использованием технологии самосовмещенного с волноводом омического контакта (рисунок 4.9).

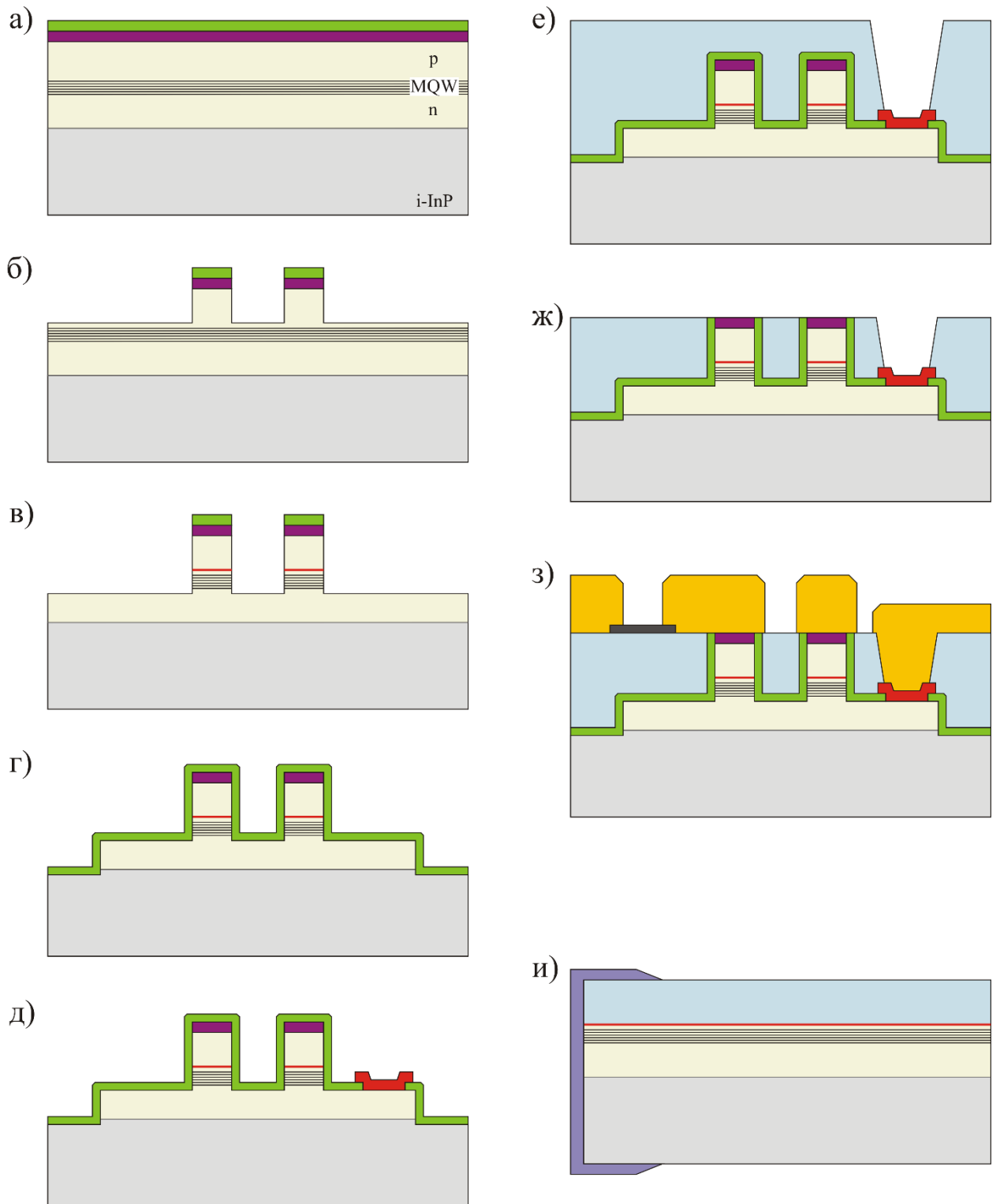


Рисунок 4.9 – Технологический маршрут изготовления электрооптического модулятора, функционирующего на основе эффекта Штарка, с использованием технологии самосовмещенного с волноводом омического контакта

Разработанный технологический маршрут состоит из следующих блоков технологических операций:

1) Нанесение плёнки ITO на поверхность гетероэпитаксиальной структуры InP/InGaAs методом магнетронного распыления с применением отклоняющей системы с последующим нанесением диэлектрического слоя нитрида кремния методом плазмохимического осаждения (рисунок 4.9 а);

2) Формирование диэлектрической маски путем проведения операций нанесения/экспонирования и проявления фоторезистивных плёнок, с последующим плазмохимическим травлением диэлектрических плёнок, удаления фоторезистивной маски, плазмохимическое травление в разработанных режимах плёнки ITO и полупроводника р-типа проводимости по маске сформированного диэлектрического рисунка (рисунок 4.9 б);

3) Формирование диэлектрической маски путем проведения операций нанесения/экспонирования и проявления фоторезистивных плёнок, с последующим плазмохимическим травлением диэлектрических плёнок, удаления фоторезистивной маски, плазмохимическое травление в разработанных режимах полупроводника i-типа проводимости по маске сформированного диэлектрического рисунка (рисунок 4.9 в);

4) Удаление остатков диэлектрической маски плазмохимическим травлением с последующим проведением отжига сформированной топологии на основе плёнок ITO;

5) Формирование диэлектрической маски путем проведения операций нанесения/экспонирования и проявления фоторезистивных плёнок, с последующим плазмохимическим травлением диэлектрических плёнок, удаления фоторезистивной маски, плазмохимическое травление в разработанных режимах полупроводника n-типа проводимости по маске сформированного диэлектрического рисунка, нанесения пассивирующего диэлектрического слоя нитрида кремния (после данной операции на поверхности подложки полностью изготавливаются все пассивные интегральные оптические элементы электрооптического модулятора) (рисунок 4.9 г);

б) Формирование омических контактов AuGeNi к полупроводникам n-типа проводимости путем проведения операций нанесения/экспонирования и

проявления фоторезистивных плёнок, травления плёнок нитрида кремния с последующим электронно-лучевым напылением многослойной металлизации, проведения обратной фотолитографии и отжига сформированной топологии на основе металлических плёнок (после данной операции на поверхности подложки полностью изготавливаются все активные интегральные оптические элементы электрооптического модулятора) (рисунок 4.9 д);

7) Планаризация подложек пленкой ВСВ, экспонирование и проявление окон, предназначенных для соединения первого и второго уровней металлизации (рисунок 4.9 е);

8) Плазмохимическое травление плёнки ВСВ до вскрытия омических контактов к полупроводникам р-типа проводимости (рисунок 4.8 ж);

9) Формирование тонкопленочного резистора путем проведения операций нанесения/экспонирования и проявления фоторезистивных плёнок, с последующим электронно-лучевым напылением резистивной металлизации, проведения обратной фотолитографии, а также формирование толстой металлизации на основе золота путем магнетронного напыления на подложку металлического золотого подслоя, проведения операций нанесения/экспонирования и проявления фоторезистивных плёнок, последующего электрохимического осаждения толстого слоя золота, операций удаления фоторезистивной маски и гравировки подслоя (после данного блока операций формируются все электрические соединения, включая СВЧ микрополосковые линии и контактные площадки электрооптического модулятора) (рисунок 4.9 з);

10) Проведение операции скрайбирования для разделения пластины на кристаллы электрооптических модуляторов;

11) Осаждение на торцы кристаллов модуляторов антиотражающего покрытия на основе разработанных процессов осаждения плёнок TiO_x и ITO (рисунок 4.9 и).

4.2 Просветляющие покрытия для изделий оптоэлектроники и радиофотоники

Одна из особенностей функционирования элементов гетероструктурной полупроводниковой оптоэлектроники и радиофотоники заключается во вводе светового излучения в полупроводниковую структуру радиофотонной интегральной схемы (РФИС) или фотодиода, а также в выводе светового излучения из полупроводниковой структуры РФИС или светодиода с минимизацией потерь. Основными физическими эффектами, ограничивающими эффективность ввода/вывода светового излучения, является преломление света и его полное внутреннее отражение на границе материала с высокой оптической плотностью (полупроводника) и материала с низкой оптической плотностью (оптоволокна и (или) воздуха) [1].

При проектировании РФИС для заведения светового излучения в полупроводниковый волновод (рисунок 4.10а) следует учитывать, что из-за разной скорости распространения светового излучения двух сред световой луч претерпевает преломление, в результате которого его направление смещается относительно положения рефлекторной решетки волновода (рисунок 4.10б). Отклонение светового луча на рефлекторной решетке от расчетного вызывает сдвиг в спектре связи от рабочей длины волны. Такой сдвиг обычно составляет около 10 нм на 1 градус отклонения луча и является значительным при минимизации потерь [144, 145].

Минимизировать отражение и преломление светового излучения удастся с помощью просветляющих покрытий, коэффициент преломления которых меньше коэффициента преломления используемой полупроводниковой подложки.

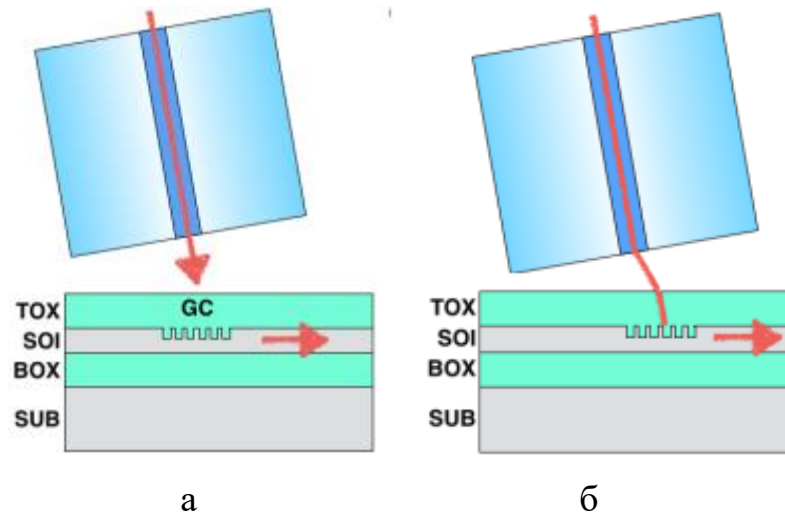


Рисунок 4.10 – Преломление светового луча при заведении в полупроводниковый волновод

С целью реализации ввода светового излучения в полупроводниковый волновод фотонных интегральных схем без преломления светового луча, а также с целью устранения эффекта полного внутреннего отражения сгенерированного светового излучения при его выводе из кристалла светодиода было проведено исследование применения оптически прозрачных оксидных плёнок в качестве просветляющего покрытия к различным подложкам на основе Si и полупроводниковых соединений A_3B_5 .

Определение оптимальной толщины просветляющего покрытия.

При определении оптимальной толщины просветляющего покрытия используется условие равенства оптической разности хода отраженных от верхней и нижней поверхности плёнки половине длины волны [145]. Взяв для расчёта рабочие длины волн на которых функционируют рассматриваемые приборы оптоэлектроники, рассчитаем оптимальные толщины просветляющих покрытий d по формулам (4.3) – (4.4):

$$d = \frac{\lambda}{4 \cdot n_1}, \quad (4.3)$$

$$n_1 = \sqrt{n_0 \cdot n_s}, \quad (4.4)$$

где λ – длина волны света, нм;

n_0 – показатель преломления воздуха, $n_0 = 1$;

n_s – показатель преломления подложки.

Результаты произведённого расчёта толщины просветляющего покрытия приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты расчета толщины просветляющего покрытия

Подложка	n_s	λ , нм	n_1	d , нм
GaN	2,29	450	1,51	74,5
GaAs	3,62	870	1,9	114,5
$\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$	3,55	632,8	1,88	206
SiGe	3,7	1550	1,92	200

Таким образом за счет интерференции и гашения друг друга лучей, отраженных от верхней и нижней поверхностей просветляющего покрытия при рассчитанных толщинах будет достигаться эффект просветления.

Расчёт коэффициента отражения при прохождении света через систему полупроводник / прозрачная оксидная пленка.

Для расчёта коэффициента отражения при прохождении светового излучения через систему полупроводник / прозрачная оксидная пленка примем, что слои данной системы не поглощают свет в соответствующей области спектра. Введем принятые для рассмотрения системы полупроводник / прозрачная оксидная пленка обозначения: показатели преломления окружающей среды n_0 и подложки n_s , а также коэффициенты отражения Френеля r_1 и r_2 (рисунок 4.11). По принятым упрощениям так как все слои непоглощающие, то величины r и n – вещественные числа, а показатели преломления, фигурирующие в уравнениях, будут считаться постоянными, не зависящими от длины волны [146].

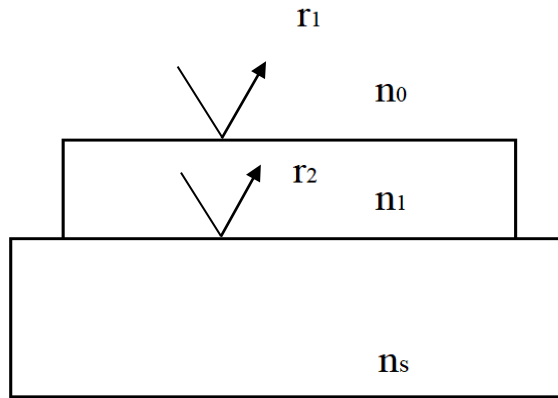


Рисунок 4.11 – Обозначения для расчёта коэффициента отражения системы полупроводник / прозрачная оксидная пленка

С учетом принятых допущений коэффициент отражения однослойного покрытия можно рассчитать по формуле (4.5):

$$R = \frac{r_1^2 + r_2^2 + 2 \cdot r_1 \cdot r_2 \cdot \cos 2 \cdot \varphi_1}{1 + r_1^2 \cdot r_2^2 + 2 \cdot r_1 \cdot r_2 \cdot \cos 2 \cdot \varphi_1}, \quad (4.5)$$

где r_1, r_2 – коэффициенты отражения Френеля:

$$r_1 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1}, \quad r_2 = \frac{n_0 - n_s}{n_0 + n_s};$$

$$\varphi_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_1 \cdot d_1}{\lambda};$$

d_1 – толщина плёнки, нм;

λ – длина волны света, нм.

Результаты расчёта параметров отражения светового излучения для системы полупроводник / оксидная пленка приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Результаты расчета коэффициентов отражения Френеля.

	GaN	In _{0,53} Ga _{0,47} As	SiGe	GaAs
n_0	1			
n_1	1,51	1,88	1,92	1,9
n_s	2,29	3,55	3,7	3,62
d_1 , нм	74,5	206	200	114,5
r_1	-0,203	-0,307	-0,316	-0,31
r_2	-0,155	-0,194	-0,197	-0,195

На рисунке 4.12 представлена рассчитанная зависимость коэффициента отражения от длины волны для разных подложек в системе полупроводник / прозрачная оксидная пленка.

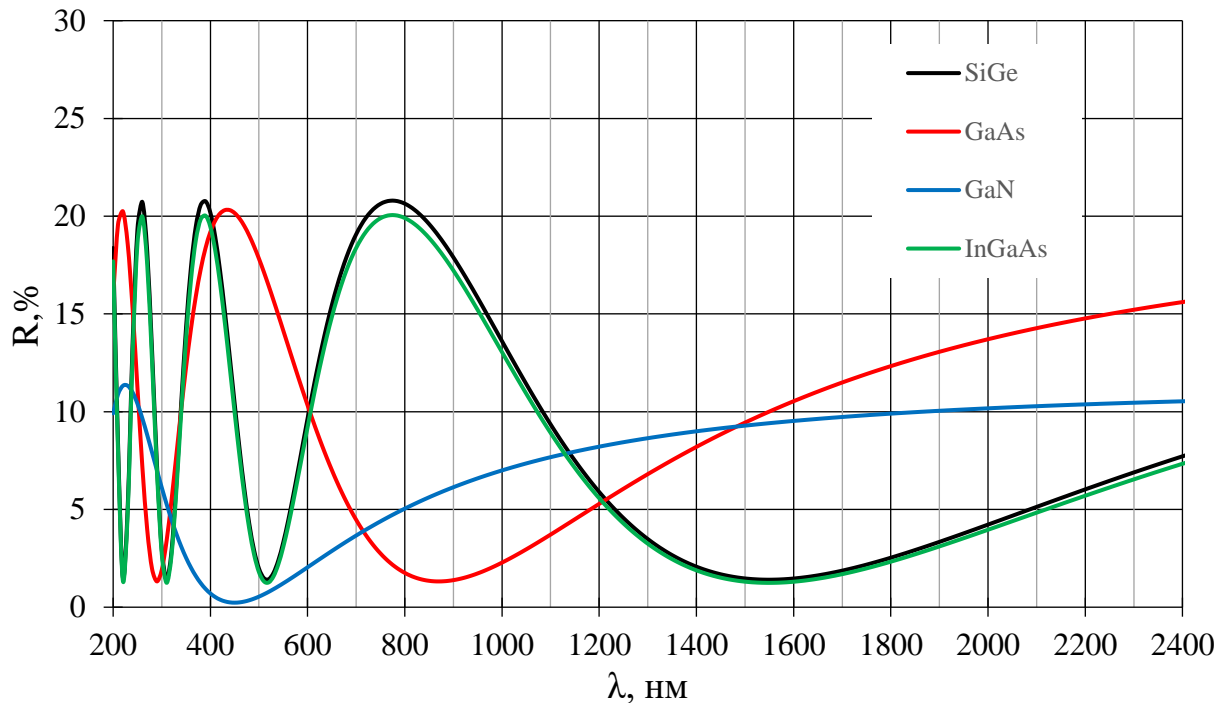


Рисунок 4.12 – Зависимость коэффициента отражения от длины волны для однослойного просветляющего покрытия на разных подложках

Проведённые расчёты спектральной зависимости коэффициента отражения системы полупроводник / прозрачная оксидная пленка показали, что просветляющие покрытия действительно способны значительно снизить отражение светового излучения, проходящего через границу раздела двух сред с разной оптической плотностью. Стоит отметить, что применение нескольких слоев антиотражающих покрытий, обеспечивающих плавное изменение показателя преломления, способствует практически полному устранению отражения и преломления луча при его прохождении через границу раздела сред. Проведенные в [111, 117, 118] исследования оптических свойств оксидных диэлектриков, осажденных методом реактивного магнетронного распыления составной углеродосодержащей мишени с возможностью управления показателем преломления за счет изменения степени модификации плёнок углеродом Sc,

показывают возможность плавного изменения показателя преломления, что особенно востребовано при вводе/выводе излучения в твердотельные волноводы. Данный подход устранения преломления светового излучения был задействован при вводе излучения в полупроводниковый волновод РФИС оптического приемника на основе монолитной 0.25 мкм SiGe BiCMOS технологии (рисунок 4.13).

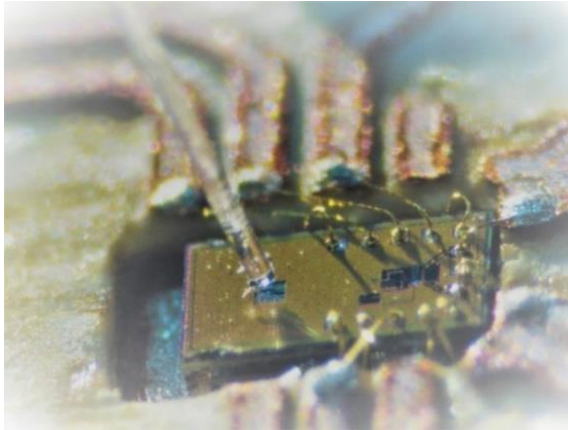


Рисунок 4.13 – Фотография кристалла интегрального оптического приемника на печатной плате с подведённым оптическим волокном

Проведение измерений характеристик данного интегрального оптического приемника производилось сотрудниками лаборатории интеллектуальных компьютерных систем кафедры КСУП ТУСУР. Проведенные измерения показали, что потери на ввод и вывод оптического сигнала, связанные с позиционированием оптического волокна и согласованием коэффициентов преломления сред распространения излучения, а также потери СВЧ сигнала, связанные с конструктивными особенностями печатной платы, составляет порядка 5-10 дБ и имеют частотнозависимый характер. Таким образом коэффициент передачи радиофотонного тракта с применением интегрального оптического приемника составляет -13...-24 дБ в диапазоне частот 1-20 ГГц.

4.3 Применение плёнок ИТО в качестве слоя растекания тока для светодиодов на основе гетероэпитаксиальных структур AlInGaN

На данном этапе разработки и производства полупроводниковых приборов, светодиоды являются одними из быстроразвивающихся оптоэлектронных приборов, при этом до сих пор существует ряд проблем при их изготовлении.

Одной из важных проблем светодиодов, является низкая величина коэффициента оптического вывода, вследствие того, что в светодиоде с тонким барьерным слоем ток инжектируется в часть активной области, которая расположена под верхним электродом (рисунок 4.14) [145]. Следовательно, свет генерируется преимущественно в области под непрозрачным металлическим контактом, что препятствует его выходу из структуры.

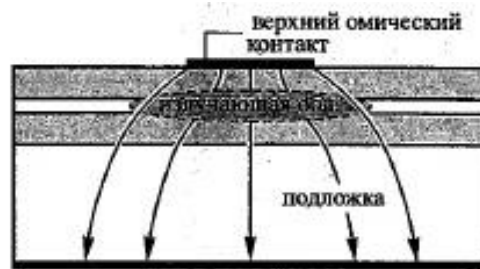


Рисунок 4.14 – Картина растекания тока в светодиодах с тонким барьерным слоем

Для решения этой проблемы применяют либо запирающий слой (рисунок 4.15 а), который отводит носители тока в стороны от верхнего контакта, препятствуя их попаданию в активную область, расположенную непосредственно под ним, либо слой растекания тока (рисунок 4.15 б).

Полезные свойства слоев растекания тока были обнаружены еще на ранних этапах развития светодиодов. Так, в [147] было показано, что применение слоев растекания тока существенно повышает оптическую мощность светодиодов GaAsP. Указанный слой растекания тока является первым полупроводниковым слоем, расположенным между верхним барьерным слоем гетероструктуры и верхним омическим контактом. Из рисунка 4.14, видно, что в светодиоде без этого слоя свет излучается только по периметру верхнего контакта, а введение

слоя растекания тока позволяет увеличить область инжекции носителей и получить более ровную и яркую излучающую поверхность, показанную на рисунке 4.14 б.

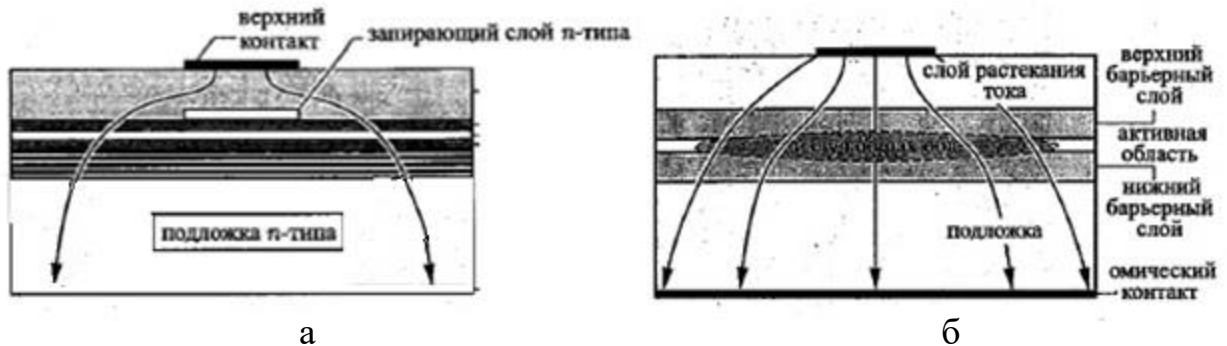


Рисунок 4.15 – Влияние ограничивающего слоя n-типа (а) и слоя растекания тока (б) на область инжекции

Таким образом, применение плёнок ITO в качестве слоя растекания тока для кристаллов светодиодов позволяют значительно увеличить эффективность готового прибора, а потому представляется задачей довольно актуальной.

В связи с этим, с целью исследования влияния плёнки ITO в качестве слоя растекания тока на поведение характеристик светодиодного кристалла планарной конструкции данный раздел посвящен моделированию светодиодного кристалла на основе гетероструктуры GaN/AlInGaN/GaN с плёнками ITO в качестве слоя растекания тока.

4.3.1 Среда для моделирования светодиода на основе гетероструктуры GaN/AlInGaN/GaN со слоем растекания тока ITO

Конструкция светодиода определяет направление, пространственное распределение, интенсивность излучения, электрические, тепловые, энергетические и другие характеристики излучения от полупроводникового кристалла. И, конечно, взаимное влияние всех этих параметров друг на друга. [145, 147] В связи с этим, при проектировании светодиода существует острая

необходимость в создании такой конструкции прибора, которая будет обеспечивать его максимальную эффективность.

Моделирование кристалла светодиода на основе гетероструктуры GaN/AlInGaN/GaN со слоем растекания тока ITO производилось в программе SimuLED [148]. SimuLED является продуктом программного обеспечения для разработки и оптимизации конструкций светодиодных структур. Он позволяет моделировать трехмерное распространение тока и теплопередачи в кристалле светодиода и предоставляет пользователю следующую информацию (рисунок 4.16):

- Трехмерные распределения электрического потенциала, плотности тока, и температуры в кристалле светодиода;
- Двухмерные распределения напряжения прямого смещения, плотности тока, внутреннего квантового выхода, и температура в плоскости активной области;
- Особенность вольтамперной характеристики, дифференциальное сопротивление, внешний квантовый выход и КПД прибора.

SimuLED решает связанную электро-тепло-оптическую задачу при помощи трех модулей:

- SiLENSe – одномерная программа моделирующая инжекцию носителей зарядов и генерацию света в гетероструктурах светодиодов на основе соединений вюрцита (ZnS), тринитридов и диоксидов.
- SpeCLED – трехмерная моделирующая программа распространения тока и теплопередачи в кристалле светодиода.
- RATRO – трехмерная моделирующая программа, прослеживающая распространение пучка света в кристалле светодиода и его экстракцию.



Рисунок 4.16 – Структурная схема среды SimuLED

Таким образом связанное электро-тепло-оптическое моделирование светодиодной структуры планарной конструкции в программном продукту SimuLED позволит дать достоверную картину распределения электрических и оптических характеристик, и проанализировать перспективы введения в состав светодиодной структуры плёнок ИТО в качестве слоя растекания тока.

4.3.2 Моделирование светодиода на основе гетероструктуры GaN/AlInGaN/GaN со слоем растекания тока ИТО

Т. к. по своей конструкции светодиодная структура состоит из диэлектрической подложки, толщиной порядка сотен микрометров, приконтактных областей полупроводника, толщиной около нескольких единиц микрометров и еще более тонкой активной области (нескольких квантовых ям, общей толщиной около десятка нанометров), то ее объемное моделирование путем разбиения структуры конечноэлементной сеткой весьма затратное как по необходимому для ее описания пользователю времени, так и по компьютерным ресурсам. В связи с этим, светодиодная структура при моделировании в SimuLED

рассматривается как набор чередующихся плёнок: подложка, толстая пленка полупроводника n-типа, активная область, толстая пленка полупроводника p-типа, металлические электроды и контактные площадки, так же, в качестве дополнительных плёнок предусмотрена пленка растекания тока ITO и тонкая пленка изолятора.

Чтобы имитировать ток, распространяющийся в кристалле светодиода, используется гибридный подход $1D/3D$. В SpeCLED ток, распространяющийся в нейтральных областях кристалла светодиода, рассматривают в пределах трехмерного приближения, в то время как зависимость между j и U может быть найдена одномерным вычислением модулем SiLENSe или определена пользователем [149]. Необходимые для электро-тепло-оптического расчета параметры гетероструктуры в программу вводились путем ее моделирования в виде многослойной структуры с известными материалами, толщинами, концентрациями примесей и дислокаций, энергиями активации доноров и акцепторов и т.д. в подпрограмме SiLENSe (рисунок 4.17).

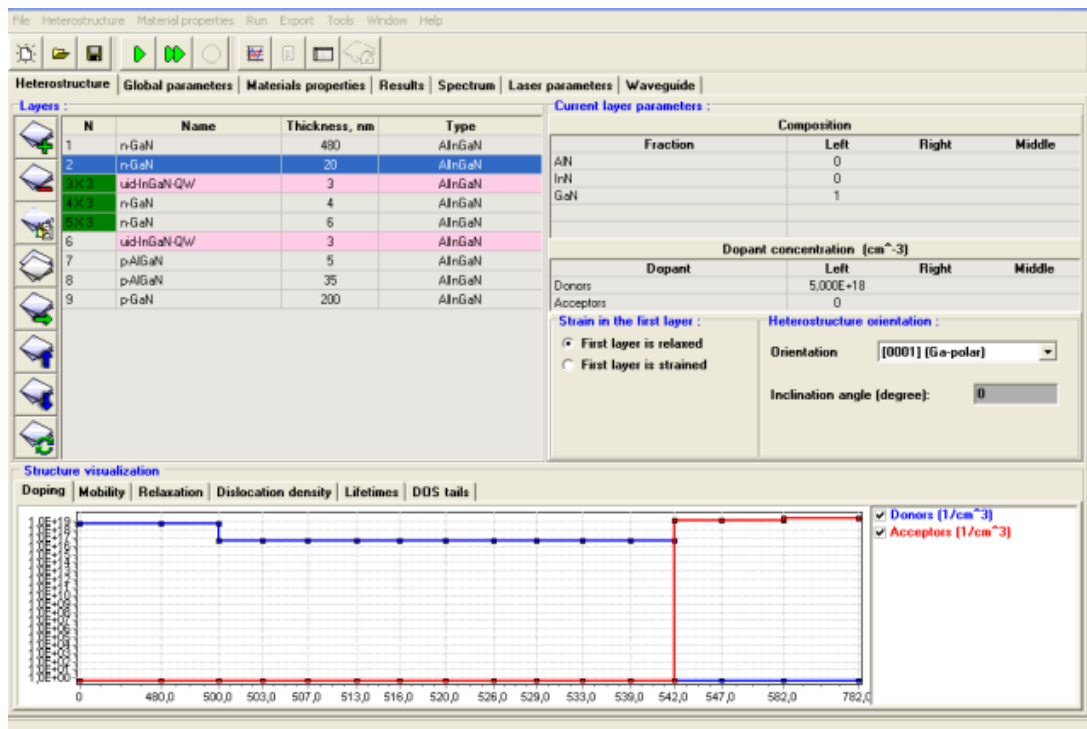


Рисунок 4.17–Моделирование гетероструктуры в SimuLED SiLENSe

В результате моделирования гетероструктуры рассчитанные зависимости плотности тока от напряжения и внутренней квантовой эффективности от плотности тока передавались в модуль SpeCLED (рисунок 4.18).

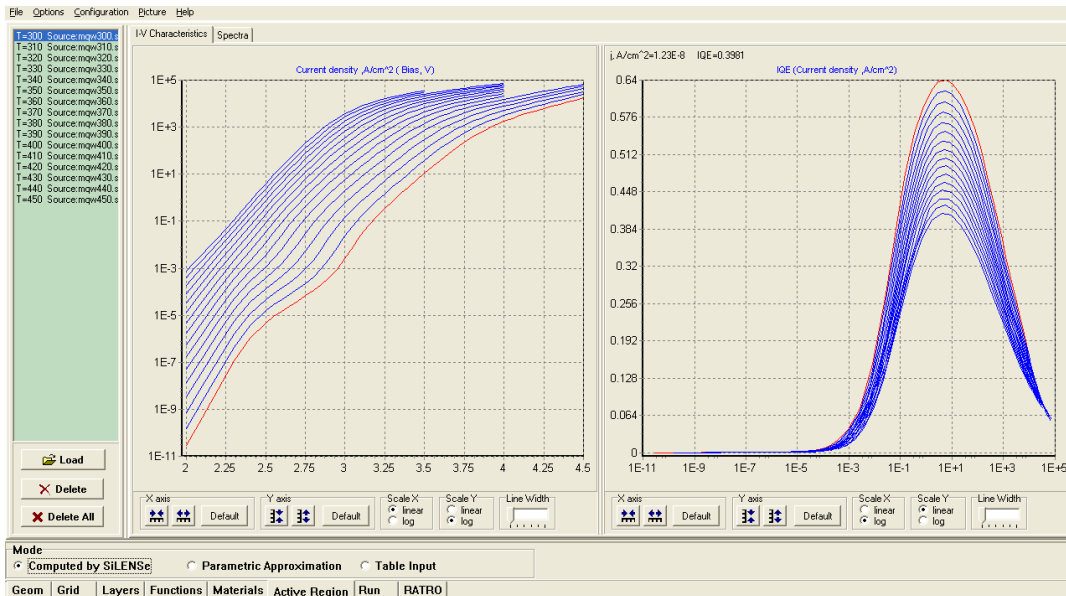


Рисунок 4.18 – Передача решения из SiLENSe в SpeCLED

Исходным вариантом моделирования планарного чипа стал светодиодный кристалл с гребенчатой топологией контактов, разработанной в АО «НИИ ПП» (г. Томск). На рисунках 4.19 и 4.20, а так же в таблице 4.4 приведены его моделируемая структура (граничные размеры которой $965 \times 965 \text{ мкм}^2$, при этом, с учетом вытравленной мезы, площадь активной области составила $0,625 \text{ мм}^2$), толщины слоев, их материалы и топология омических контактов. В качестве слоя растекания тока в данном чипе применяется пленка ITO. Описание свойств слоя ITO в SimuLED SpeaCLED позволяет учесть его связанные электрические, тепловые и оптические свойства. Задаваемые параметры слоя растекания тока представлены на рисунке 4.20.

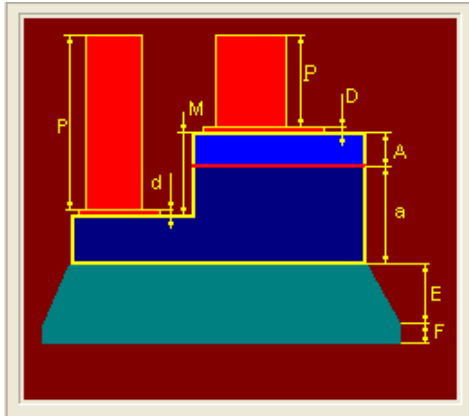


Рисунок 4.19 – Выбранный тип моделируемого чипа

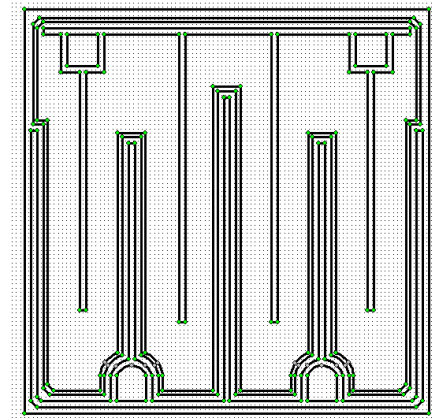


Рисунок 4.20 – Топология контактов

Таблица 4.4 – Толщины и материалы светодиодной структуры, задаваемые при моделировании.

Параметр	Материал/ задаваемая толщина (мкм)	σ , (1/(Ом·см))	λ , (Вт/(м ² ·К))
<i>n</i> -semiconductor (<i>a</i>)	<i>n</i> -GaN / 4		120
<i>p</i> -semiconductor (<i>A</i>)	<i>p</i> -GaN / 0,5		120
mesa depth (<i>M</i>)	----- / 0,7	-----	-----
<i>p</i> -electrode (<i>D</i>)	Ni-Au / 0,03-0,1	$3.727 \cdot 10^5$	267
<i>n</i> -electrode (<i>d</i>)	Ti-Al-Ni-Au / 0,05-0,15-0,1-0,1	$2.814 \cdot 10^5$	194.4
<i>p</i> -pad (<i>p</i>)	Au / 2,5	$4.5 \cdot 10^5$	320
<i>n</i> -pad (<i>P</i>)	Au / 2,5	$4.5 \cdot 10^5$	320
top substrate (<i>E</i>)	Sapphire / 100	-----	40
bottom substrate (<i>F</i>)	Sapphire / 0	-----	40

Задаваемые контактные сопротивления между слоями структуры следующие:

- *p*-electrode / ITO – $6 \cdot 10^{-4}$ Ом·см²;
- ITO / *p*-GaN – $1 \cdot 10^{-2}$ Ом·см²;
- *n*-electrode / *n*-GaN – $4 \cdot 10^{-6}$ Ом·см².

Отвод тепла учитывается только через поверхность монтажа и задается начальной температурой в этих местах (300 К) и коэффициентами теплопереноса ($1 \cdot 10^5$ Вт/(м²·К)).

Следует сказать, что при решении оптической задачи связанная подпрограмма SimuLED RATRO позволяет учитывать отражение, поглощение и преломление генерируемого в активной области оптического излучения омическими контактами, слоями полупроводника и подложки, а так – же задавать различные виды текстурированной и отражающей поверхностей, которые в данной конструкции светодиодной структуры не применяются [148].

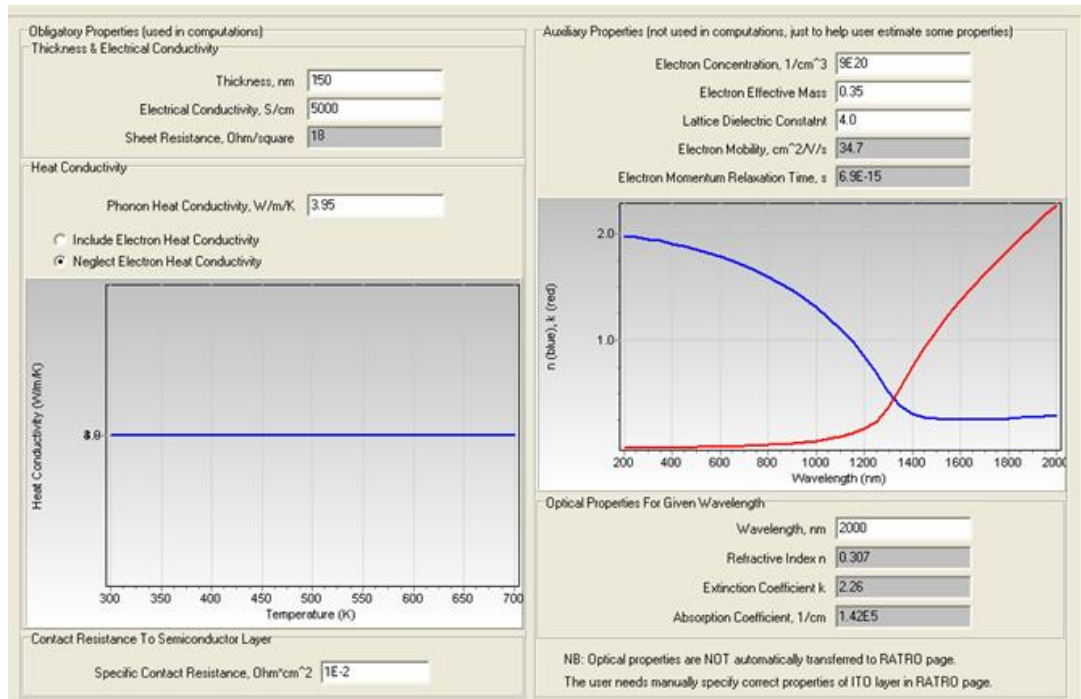


Рисунок 4.21 – Окно описания свойств слоя ITO

Полученные при моделировании параметры светодиодного планарного чипа сведены в таблицу 4.5. На рисунке 4.22 приведены поля распределения электрических и оптических характеристик по поверхности активной области светодиодной структуры.

Таблица 4.5 – Полученные параметры моделирования планарного светодиода

Напряжение пр. смещения 3,0851 В;	Полная оптическая мощность, сгенерированная в активной области $W_o=0.1283\text{Вт}$;	Падение мощности в чипе в различных областях, [мВт] active region : 341,9686 в областях контактов слоев чипа: n-electrode : 0,1296 p-electrode : 21,5302 в объемах слоев структуры: n-semiconductor : 15,4999 p-semiconductor : 0,2386 n-electrode : 0,9065 p-electrode : 0,0209 n-pad : 0,5251 p-pad : 0,4862 substrate : 1,720E-15	Доля мощности оптического излучения, поглощаемой в объеме каждого слоя чипа / выходящей через его грани active zone $0.0876*W_o / 0.0000*W_o$ top p-contact : $0.4168*W_o / 0.0317*W_o$ top n-contact : $0.2819*W_o / 0.0004*W_o$ bottom substrate : $0.0000*W_o / 0.0447*W_o$ sloping substrate : $0.0000*W_o / 0.0366*W_o$
Ток смещения 0,15 А;			
Мощность 0,463 Вт;			
Плотность тока сред. / макс. 24,02 / 39,38 [А/см ²]			

Анализируя полученные результаты при моделировании светодиодного чипа планарной конструкции, следует отметить следующее.

- Поля распределения плотности тока, напряжения, мощности, выделяемой в виде тепла и оптического излучения, имеют схожие контуры областей максимальных и минимальных значений.
- Плотность тока (рисунок 4.22 а) при удалении от металлизаций омических контактов стремительно уменьшается.
- Эффективность экстракции оптического излучения (рисунок 4.22 д) возрастает с удалением от металлизации р-контакта.
- Доля мощности оптического излучения, выходящая через верхние поверхности n- и р-контактов меньше доли излучения, выходящей через нижнюю поверхность сапфировой подложки примерно на 30%, однако, вследствие разницы площадей этих поверхностей на такую же величину, плотности выходящих через них мощностей излучений лежат в одном диапазоне (рисунок 4.22 е). Так же, моделирование показывает, что значительная часть мощности оптического излучения выходит через боковые грани n- и р-контактов и сапфировой подложки. Таким образом, с точки зрения вывода сгенерированного активной областью излучения, наиболее эффективным ожидается флип-чип

расположение кристалла с применением рефлекторов, отражающих свет от боковых граней.

- Основную часть выделившегося из структуры тепла составляет тепловыделение в активной области (как за счет джоулева разогрева, так и за счет поглощения части генерируемого оптического излучения) – порядка 80%, однако, значительную долю так же составляет и тепло, выделившееся на границах контактов слоев структуры пропорционально контактным сопротивлениям.

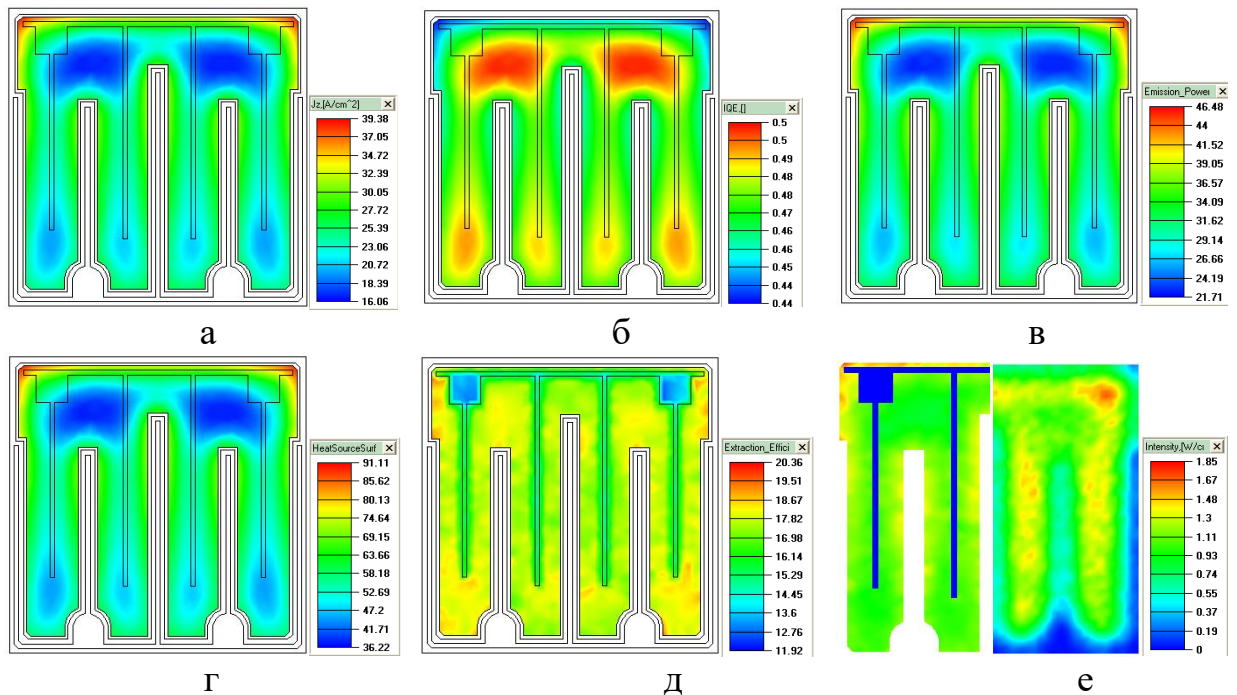


Рисунок 4.22 – Поля распределения электрических и оптических характеристик по поверхности активной области планарной светодиодной структуры:

- а – распределение плотности тока, [А/см²];
- б – распределение внутренней квантовой эффективности, [%];
- в – распределение полной оптической мощности, сгенерированной в активной области, [Вт/см²];
- г – распределение мощности, выделяемой в виде тепла, [Вт/см²];
- д – распределение эффективности экстракции оптического излучения, [%];
- е – распределение мощности оптического излучения, выходящего через верхнюю поверхность слоя ИТО (с лева) и нижнюю поверхность сапфировой подложки (с права), [Вт/см²];

После получения эталонной модели планарного кристалла светодиода с целью определения влияния введения в конструкцию светодиодной структуры

прозрачного слоя растекания тока ITO на изменение электрических и оптических характеристик светодиодного кристалла с помощью моделирующего программного комплекса SimuLED было проведено несколько опытов.

Влияние изменения контактного сопротивления ITO / p-GaN.

Влияние изменения контактного сопротивления слоя растекания тока к приконтактной области полупроводника исследовалось следующим образом. Для описанной и смоделированной эталонной светодиодной структуры при фиксированном значении тока смещения 0,15 А была произведена серия расчетов с изменяющимся контактным сопротивлением контакта ITO / p-GaN от $7,5 \cdot 10^{-2}$ Ом·см² до $7,5 \cdot 10^{-5}$ Ом·см².

Значения некоторых наиболее значимых рассчитанных параметров для удобства анализа сведены в таблицу 4.6

Как видно из результатов, при уменьшении контактного сопротивления ITO/p-GaN, происходит снижение рабочего напряжения прибора и увеличивается максимальное значение плотности тока в структуре. Это связано с тем, что мощность, рассеиваемая на границе ITO/p-GaN, в зависимости от значения контактного сопротивления изменяется в широких пределах от долей процента, до нескольких десятков. Следовательно, для снижения энергетических затрат, связанных с тепловыделением в структуре, оптимальное значение рассматриваемого контактного сопротивления не должно превосходить более $1 \cdot 10^{-2}$ Ом·см², т.к. в противном случае мощность, рассеиваемая в контакте, стремительно возрастает, а КПД прибора сильно снижается. Снижение КПД прибора при значениях контактного сопротивления ITO/p-GaN ниже $1 \cdot 10^{-3}$ Ом·см² обусловлено наличием максимума зависимости внутренней квантовой эффективности от плотности тока смещения.

Таблица 4.6 – Исследование влияния контактного сопротивления ИТО / p-GaN на характеристики планарной светодиодной структуры

Контактное сопротивление ИТО–p-GaN, [Ом·см ²]	Напряжение пр. смещения, [В] Мощность, [Вт]	Плотность тока сред. / макс. [А/см ²]	Мощность опт. излучения, извлекаемая из чипа во всех направлениях, [Вт] / КПД прибора, [%]	Падение мощности в активной области / в области контакта ИТО–p-GaN/итоговое в чипе: значение, [мВт] ≈ доля от общей потреб. мощности, [%]
$7,5 \cdot 10^{-2}$	$\frac{4,64}{0,696}$	24,03 / 27,11	$\frac{0,19}{27,25\%}$	$340 \approx 48,9\%$ / $270,5 \approx 38,9\%$ / $655 \approx 94,1\%$
$5 \cdot 10^{-2}$	$\frac{4,04}{0,606}$	24,03 / 28,24	$\frac{0,191}{31,45\%}$	$341 \approx 56,3\%$ / $180,5 \approx 29,8\%$ / $566 \approx 93,4\%$
$2,5 \cdot 10^{-2}$	$\frac{3,45}{0,518}$	24,03 / 31,3	$\frac{0,1915}{37,1\%}$	$341 \approx 65,9\%$ / $90,6 \approx 17,5\%$ / $476 \approx 92,0\%$
$1 \cdot 10^{-2}$	$\frac{3,08}{0,462}$	24,02 / 39,38	$\frac{0,192}{41,5\%}$	$342 \approx 74,0\%$ / $36,90 \approx 8,0\%$ / $422 \approx 91,3\%$
$7,5 \cdot 10^{-3}$	$\frac{3,02}{0,453}$	24,02 / 43,25	$\frac{0,192}{42,35\%}$	$342 \approx 75,5\%$ / $28,00 \approx 6,2\%$ / $412 \approx 90,9\%$
$5 \cdot 10^{-3}$	$\frac{2,96}{0,444}$	24,02 / 50,00	$\frac{0,1915}{43,15\%}$	$342 \approx 77,0\%$ / $19,14 \approx 4,3\%$ / $403 \approx 90,8\%$
$2,5 \cdot 10^{-3}$	$\frac{2,89}{0,434}$	24,03 / 65,89	$\frac{0,1905}{43,85\%}$	$342 \approx 78,9\%$ / $10,24 \approx 2,4\%$ / $393 \approx 90,7\%$
$1 \cdot 10^{-3}$	$\frac{2,85}{0,428}$	24,02 / 94,18	$\frac{0,188}{44,05\%}$	$343 \approx 80,2\%$ / $4,66 \approx 1,1\%$ / $387 \approx 90,5\%$
$7,5 \cdot 10^{-4}$	$\frac{2,84}{0,426}$	24,02 / 104,6	$\frac{0,187}{43,95\%}$	$344 \approx 80,8\%$ / $3,64 \approx 0,9\%$ / $386 \approx 90,6\%$
$2,5 \cdot 10^{-4}$	$\frac{2,82}{0,423}$	24,02 / 143,8	$\frac{0,185}{43,9\%}$	$344 \approx 81,3\%$ / $2,81 \approx 0,7\%$ / $383 \approx 90,5\%$
$7,5 \cdot 10^{-5}$	$\frac{2,81}{0,422}$	24,02 / 178,6	$\frac{0,18}{43,45\%}$	$344 \approx 81,6\%$ / $2,74 \approx 0,7\%$ / $382 \approx 90,6\%$

Для наглядности изменения полей распределения плотности тока по поверхности гетероструктуры и внутреннего квантового выхода при различных значениях контактного сопротивления ИТО/p-GaN, на рисунках 4.23 и 4.24 приведены поля их распределения.

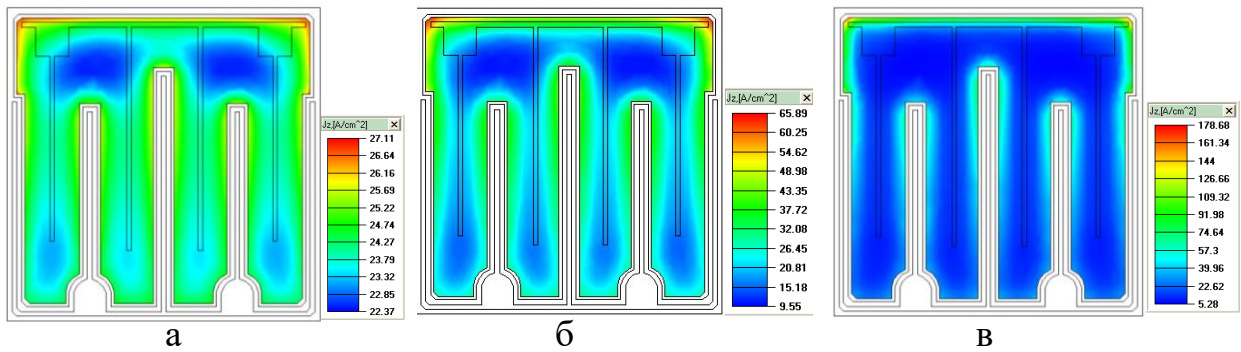


Рисунок 4.23 – Поля распределения плотности тока по активной области структуры при различном контактном сопротивлении ITO/p-GaN:

а–контактное сопротивление ITO/p-GaN $7,5 \cdot 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$;

б–контактное сопротивление ITO/p-GaN $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$;

в–контактное сопротивление ITO/p-GaN $7,5 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$

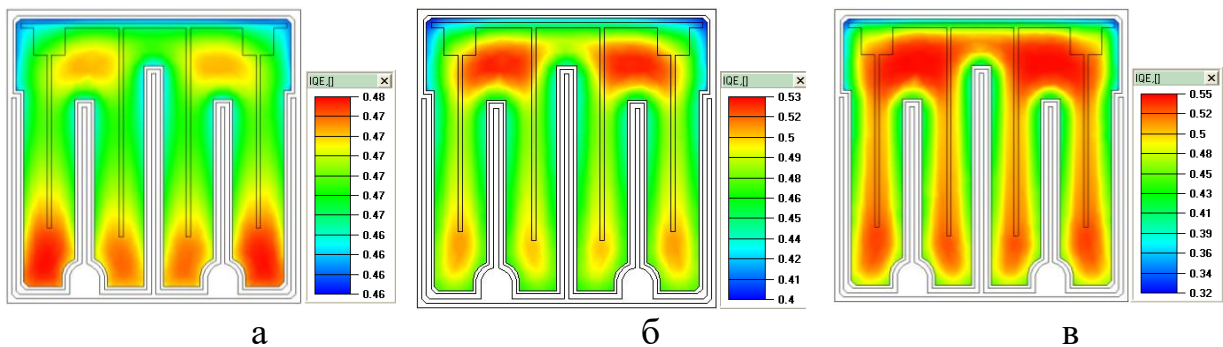


Рисунок 4.24 – Поля распределения внутреннего квантового выхода (IQE) по активной области структуры при различном контактном сопротивлении ITO/p-GaN:

а–контактное сопротивление ITO/p-GaN $7,5 \cdot 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$;

б–контактное сопротивление ITO/p-GaN $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$;

в–контактное сопротивление ITO/p-GaN $7,5 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$

Таким образом, определение наиболее приемлемого значения контактного сопротивления с одной стороны ограничено рассеиваемой в контакте мощностью, выделяемой в виде тепла, а с другой стороны энергетической характеристикой самой гетероструктуры прибора. Технологически эта задача может решаться, например, путем введения подслоя никеля, вожденного в

полупроводник, как описано в [150], и (или) подборкой наиболее оптимального режима нанесения плёнки ИТО для конкретного случая.

Влияние толщины слоя рассекания тока ИТО

Оценка влияния толщины плёнки ИТО проводилась следующим образом. При заданном значении контактного сопротивления ИТО/p-GaN, равного $1 \cdot 10^{-2}$ Ом·см² изменялось значение толщины слоя ИТО. Значения некоторых рассчитанных параметров светодиодной структуры приведены в таблице 4.7.

Анализ полученных результатов показывает, что увеличение толщины слоя растекания тока, приводит к его меньшему поверхностному сопротивлению, что описывается теорией размерного эффекта (более расширенная зависимость поверхностного сопротивления плёнки ИТО от ее толщины представлена на рисунке 4.25). Это, в свою очередь, приводит к более равномерному распределению тока и внутренней квантовой эффективности по активной области светодиода (рисунок 4.26), что в свою очередь дает более однородную генерацию оптического излучения в активной области.

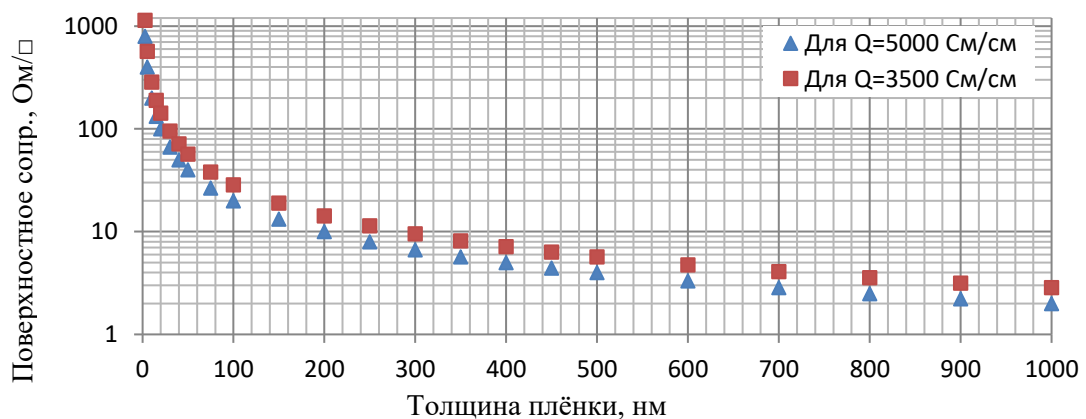


Рисунок 4.25 – Зависимость поверхностного сопротивления слоя ИТО от его толщины при разных значениях электропроводности

Однако, с другой стороны, как и ожидалось, при увеличении толщины плёнки ИТО со 100 нм до 500 нм, увеличивается и доля поглощаемых в объеме материала фотонов с 36% до 45% соответственно, что ведет к снижению эффективности экстракции генерируемого светового излучения (рисунок 4.26 и рисунок 4.27). Таким образом проведенное моделирование подтверждает корректность выбранной нами в главе 2 наиболее оптимальной толщины 130 нм

для отработки технологии напыления плёнок ITO и исследования их электрофизических свойств.

Таблица 4.7 – Влияние толщины ITO на некоторые параметры светодиода

Толщина плёнки ITO, [нм] Ее поверхностное сопротивление при электропроводности $5 \cdot 10^3$ (Ом·см) ⁻¹ , [Ом/квadrat]	Напряжение пр. смещения, [В] Плотность тока сред. / макс. [А/см ²]	Полная оптическая мощность, сгенерированная в активной области, [Вт]	Доля мощности оптического излучения, поглощаемая в объеме каждого слоя чипа / выходящая через его грани 1) active zone 2) top p-contact 3) top n-contact 4) lateral p- and n-contact 5) bottom substrate
<u>100</u> 20	<u>3,1103</u> 24,024/ 42,253	<u>Wo=0.1918</u>	1) 0.0933*Wo / 0.0000*Wo 2) 0.3626*Wo / 0.0337*Wo 3) 0.3221*Wo / 0.0004*Wo 4) 0.0000*Wo / 0.1022*Wo 5) 0.0000*Wo / 0.0448*Wo
<u>150</u> 13,3	<u>3,0984</u> 24,024/ 41,050	<u>Wo=0.1919</u>	1) 0.0906*Wo / 0.0000*Wo 2) 0.3880*Wo / 0.0337*Wo 3) 0.3053*Wo / 0.0004*Wo 4) 0.0000*Wo / 0.1012*Wo 5) 0.0000*Wo / 0.0436*Wo
<u>200</u> 10	<u>3,0907</u> 24,023/ 40,127	<u>Wo=0.1920</u>	1) 0.0887*Wo / 0.0000*Wo 2) 0.4055*Wo / 0.0348*Wo 3) 0.2916*Wo / 0.0004*Wo 4) 0.0000*Wo / 0.1007*Wo 5) 0.0000*Wo / 0.0422*Wo
<u>250</u> 8	<u>3,0851</u> 24,023/ 39,383	<u>Wo=0.1920</u>	1) 0.0876*Wo / 0.0000*Wo 2) 0.4168*Wo / 0.0317*Wo 3) 0.2819*Wo / 0.0004*Wo 4) 0.0000*Wo / 0.1003*Wo 5) 0.0000*Wo / 0.0447*Wo
<u>300</u> 6,67	<u>3,0807</u> 24,022/ 38,766	<u>Wo=0.1921</u>	1) 0.0869*Wo / 0.0000*Wo 2) 0.4263*Wo / 0.0340*Wo 3) 0.2759*Wo / 0.0004*Wo 4) 0.0000*Wo / 0.1003*Wo 5) 0.0000*Wo / 0.0412*Wo
<u>350</u> 5,71	<u>3,0772</u> 24,022/ 38,243	<u>Wo=0.1921</u>	1) 0.0865*Wo / 0.0000*Wo 2) 0.4351*Wo / 0.0313*Wo 3) 0.2700*Wo / 0.0004*Wo 4) 0.0000*Wo / 0.1003*Wo 5) 0.0000*Wo / 0.0440*Wo
<u>400</u> 5	<u>3,0742</u> 24,022/ 37,792	<u>Wo=0.1921</u>	1) 0.0862*Wo / 0.0000*Wo 2) 0.4427*Wo / 0.0318*Wo 3) 0.2659*Wo / 0.0004*Wo 4) 0.0000*Wo / 0.1001*Wo 5) 0.0000*Wo / 0.0423*Wo
<u>450</u> 4,44	<u>3,0717</u> 24,022/ 37,400	<u>Wo=0.1921</u>	1) 0.0858*Wo / 0.0000*Wo 2) 0.4477*Wo / 0.0316*Wo 3) 0.2623*Wo / 0.0004*Wo 4) 0.0000*Wo / 0.1001*Wo 5) 0.0000*Wo / 0.0419*Wo
<u>500</u> 4	<u>3,0695</u> 24,022/ 37,056	<u>Wo=0.1921</u>	1) 0.0855*Wo / 0.0000*Wo 2) 0.4525*Wo / 0.0299*Wo 3) 0.2584*Wo / 0.0004*Wo 4) 0.0000*Wo / 0.0997*Wo 5) 0.0000*Wo / 0.0433*Wo

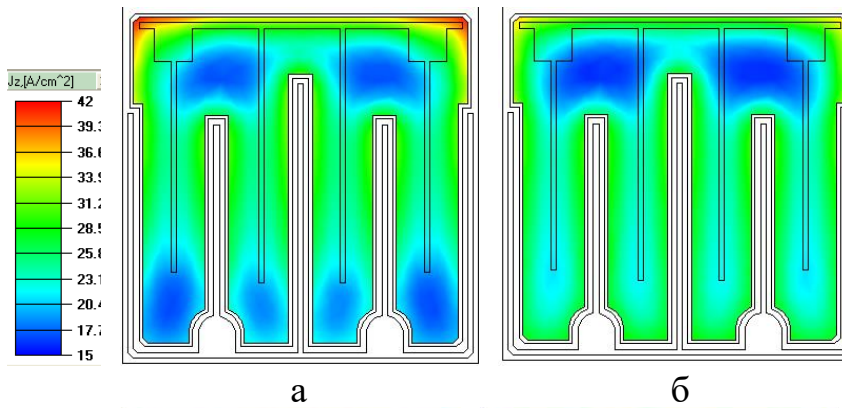


Рисунок 4.26 –
Распределение
плотности тока по
активной области
светодиода при
толщине слоя ITO 100
нм (а), и 500 нм(б)

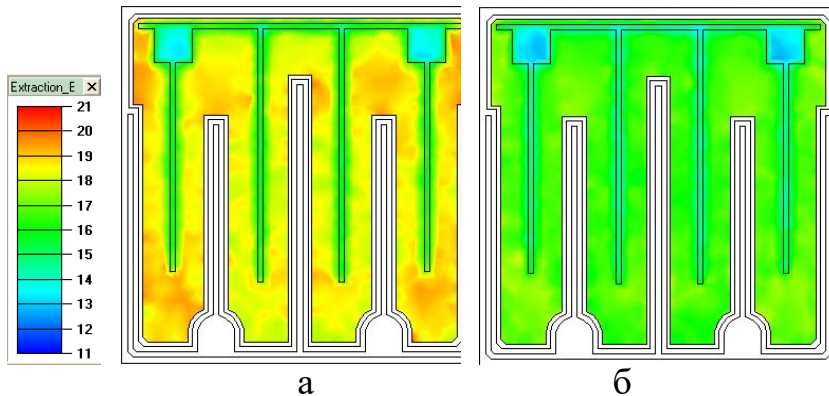


Рисунок 4.27 –
Распределение
эффективности экстрак-
ции оптического излу-
чения из активной
области светодиода при
толщине слоя ITO
100 нм (а), и 500 нм (б)

Следует отметить, что моделирование подтвердило выявленный авторами в [2] факт о том, что увеличение электронной концентрации слоя ITO, благоприятное для токораспределения, увеличивает поглощение проходящего через ITO света, отрицательно влияя на его извлечение из чипа. С подобным явлением мы также столкнулись при разработке технологии синтеза плёнок ITO в разделе 2.3, когда была прослежена зависимость коэффициента пропускания плёнок ITO от их электропроводности. В связи с этим, в технологии изготовления светодиодов с применением плёнок ITO становится важным не только контроль толщины плёнки, но и условий ее нанесения и отжига.

Выводы к главе 4

Проведенные исследования практического применения плёнок ITO показали их актуальность при использовании в полупроводниковых гетероструктурных приборах оптоэлектроники.

Показано, что применение плёнок ITO в качестве контактного слоя к слою p -InGaAs при формировании электрооптического модулятора образует омический

контакт с контактным сопротивлением не выше 10^{-4} Ом·см². Это позволило применить плёнки ITO при изготовлении омических контактов на волноводных структурах электрооптического модулятора, выполненного на основе гетероструктуры InP/InGaAs по самосовмещённой технологии.

Показана возможность применения прозрачных оксидных плёнок в качестве просветляющего покрытия полупроводниковых гетероструктурных устройств оптоэлектроники.

Проведенное моделирование светодиода, в качестве слоя растекания тока в котором выступала плёнка ITO также показало перспективность ее введения в конструкцию чипа. Показано, что введение плёнки ITO способствует увеличению КПД светодиода более чем на 50%. При этом, напыление плёнок ITO магнетронной распылительной системой с магнитной отклоняющей системой, разработанной в главе 2, дает возможность уменьшить радиационное воздействие плазмы магнетронного разряда на гетероструктуру прибора при напылении плёнок ITO, что ранее являлось сдерживающим фактором.

Помимо применений плёнок ITO в составе оптоэлектронных приборов, описанных в данной главе они успешно были применены в качестве прозрачных проводящих электродов различных электротехнических устройств. Так применение исследуемых плёнок ITO осуществлялось в следующих приложениях:

- формирование катодно-анодной части органических светоизлучающих диодов [126, 131];
- формирование прозрачных электродов электрохромных устройств [124];
- формирование тонкопленочных нагревательных элементов [96, 132].

Заключение

В диссертационной работе разработаны физико-химические основы технологии получения тонких низкоомных, прозрачных плёнок ИТО методом магнетронного распыления с уменьшением радиационного воздействия на подложку для формирования прозрачных омических контактов к изделиям гетероструктурной полупроводниковой оптоэлектроники.

1. Была разработана технология осаждения низкоомных оптически прозрачных плёнок ИТО с удельным сопротивлением ниже $1 \cdot 10^{-4}$ Ом·см при коэффициенте пропускания на уровне 85 – 90%. В результате исследования электрофизических свойств плёнок ИТО, осажденных по разработанной методике установлено, что высокотемпературный отжиг плёнок ИТО, проводимый после их осаждения способствует снижению удельного сопротивления плёнок. Экспериментально показано, что в результате проведения высокотемпературного отжига примесь в пленках ИТО полностью становится электрически активной, что приводит к увеличению концентрации электронов проводимости.

2. Экспериментально установлена смена механизма электропроводности плёнок ИТО от полупроводникового к металлическому при проведении высокотемпературного отжига при температурах выше 300°C . Показано, что наряду со сменой механизма электропроводности в результате высокотемпературного отжига плёнки ИТО представляют из себя вырожденный полупроводник n-типа с положением уровня Ферми выше уровня E_C на 0,09 эВ.

3. Создана магнитная отклоняющая система особой конструкции, размещаемая между магнетронной распылительной системой и подложкой и отклоняющая пролетающие через нее заряженные частицы плазмы газового разряда. Экспериментально показано, что применение созданной магнитной отклоняющей системы позволяет уменьшить радиационное и термическое воздействие на подложку.

4. Экспериментально установлено, что контакт ИТО/*p*-InGaAs является омическим и имеет линейную симметричную ВАХ без отжига плёнок ИТО с

контактным сопротивлением на уровне $10^{-4} - 10^{-5}$ Ом·см². При этом, значение контактного сопротивление ограничивается удельным сопротивлением самой плёнки ИТО.

5. Установлено, что уменьшение радиационного и термического воздействия плазмы газового разряда на подложку и растущую на ее поверхности пленку ИТО ведет к увеличению удельного сопротивления плёнок ИТО. Однако, при рассмотрении контакта ИТО/p-InGaAs показано, что при напылении плёнок ИТО с применением магнитной отклоняющей системы контактное сопротивление ИТО/p-InGaAs обладает лучшей температурной стабильностью.

6. Показано, что применение плёнок ИТО в качестве слоя растекания тока для гетероструктурных светодиодов способствует увеличению их КПД более чем на 50 %.

Основные результаты исследований по теме диссертации опубликованы в работах [82-98, 109-118, 121-134].

Автор выражает глубокую признательность научному руководителю д.т.н., заведующему кафедрой физической электроники ТУСУР, П.Е. Трояну.

Автор выражает благодарность коллективу ОА «НИИ ПП» (г. Томск): И.Д. Филимоновой, Д.Д. Каримбаеву, Л.М. Ромась за предоставление технологического оборудования для изготовления экспериментальных образцов; д.т.н., профессору кафедры ФЭ ТУСУР, С.В. Смирнову за обсуждение полученных результатов; к.т.н., доценту кафедры ФЭ ТУСУР, Ю.В. Сахарову за обсуждение полученных результатов; к.т.н., инженеру НОЦ НТ ТУСУР, С.В. Ишуткину за помощь в изготовлении образцов контактов ИТО/p-InGaAs и обсуждение полученных результатов.

Автор выражает свою благодарность представителям компании АО "ГРУППА СТР" (г. Санкт-Петербург) за предоставление ознакомительной лицензии на использование программы SimuLED.

Список литературы

1. Данилина, Т.И. Создание микрорельефных поверхностей в просветляющих оптических покрытиях для повышения внешней квантовой эффективности синих светодиодов на основе GaN / Т.И. Данилина, П.Е. Троян, И.А. Чистоедова // Доклады ТУСУР. – 2011. – № 2(24), ч. 2. – С. 64.
2. Bogdanov, M.V. Effect of ITO spreading layer on performance of blue light-emitting diodes / M.V. Bogdanov, K.A. Bulashevich, O.V. Khokhlev, I.Yu. Evstratov, M.S. Ramm, S.Yu. Karpov // Phys. stat. solid. – 2010. – № 7–8. – P. 2127.
3. Hard Carbon Coating (DLC: «Diamond-Like Coating») [Электронный ресурс] // ЗАО "Тидекс". – 2018. – Режим доступа: <http://www.tydexoptics.com/materials1/coatings/dlcocoatings/>.
4. Семикина, Т.В. Оксидная электроника как одно из направлений прозрачной электроники / Т.В. Семикина, В.Н. Комащенко, Л.Н. Шмырева // Электроника и связь – 2010. - No3. – С. 20–28.
5. Использование прозрачной проводящей плёнки для сенсорной панели. Отчет – 2013 // Informa Tech. – 2014. Режим доступа: www.displaybank.com/eng/research/report_view.html?id=608&cate=7.
6. Смирнова, И.П. Оптимизация технологии нанесения тонких плёнок ITO, применяемых в качестве прозрачных проводящих контактов светодиодов синего и ближнего ультрафиолетового диапазонов / И.П. Смирнова, Л.К. Марков, А.С. Павлюченко, М.В. Кукушкин, С.И. Павлов // Физика и техника полупроводников. – 2014. – Т. 48, вып. 1. – С. 61.
7. Cao, X.A. Effects of interfacial oxides on Schottky barrier contacts to n- and p-type GaN / X.A. Cao, S.J. Pearton, A.P. Zhang, G.T. Dang, F. Ren, R.J. Shul, L. Zhang, R. Hickman, J.M. Van Hove // Applied Physics Letters. – 1999. – V.75. – P. 2569.

8. Margalith, T. Indium tin oxide contacts to gallium nitride optoelectronic devices // T. Margalith, O. Buchinsky, D.A. Cohen, A.C. Abare, M. Hansen, S.P. DenBaars, L.A. Coldren. // *Applied Physics Letters*. – 1999. – V.74. – P. 3930.
9. Morgan, D.V. Annealing Effects on Opto-Electronic Properties of Sputtered and Thermally Evaporated Indium-Tin-Oxide Films / D. V. Morgan, Y. H. Aliyu. R. W. Bunco, A. Salehi // *Thin Solid Films*. – 1998. – V.312. – P. 268.
10. Великовский, Л.Э. Полевые транзисторы на GaN / Л.Э. Великовский, Д.М. Красовицкий, В.Г. Мокеров, Ю.В. Погорельский, И.А. Соколов, М.В. Степанов, В.П. Чалый, С.П. Яковлев, Н.Н. Базлов // Тезисы докладов всероссийской конференции «НИТРИДЫ ГАЛЛИЯ, ИНДИЯ И АЛЮМИНИЯ - СТРУКТУРЫ И ПРИБОРЫ». МГУ им. Ломоносова, ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН. – 2001. – С. 16.
11. Марков, Л.К. Отражающий р-контакт на основе тонких плёнок ИТО для флип-чип-светодиодов AlGaInN / Л.К. Марков, И.П. Смирнова, А.С. Павлюченко, Е.М. Аракчеева, М.М. Кулагина // *Физика и техника полупроводников*. – 2009. – Т. 43, № 11. – С. 1564.
12. Bellitto, V.J. Transition from the above mentioned gap states RL Henry / V.J. Belitto, B.D. Thoms, D.D. Koleske, A.E. Wickenden. // *Surface Science*. – 1999. – 80. – P.430.
13. Ishikawa, H. Effects of surface treatments and metal work functions on electrical properties at p-GaN/metal interfaces / H. Ishikawa, S. Kobayashi, Y. Koide, S. Yamasaki, S. Nagai, J. Umezaki, M. Koike, M. Murakami // *Journal of applied physics*. – 1997. – 81(3). – P.1315.
14. Machuca, F. Simple method for cleaning gallium nitride (0001) / F. Machuca, Z. Liu, Y. Sun, P. Pianetta, W.E. Spicer, R.F.W. Pease // *Journal of Vacuum Science & Technology*. – 2002. – A 20. – P.1784.
15. Falk, G. Sintering of ceramics – new emerging techniques / G. Falk. – Croatia: InTech, 2012. – 587 p.
16. Wager, J.F. Transparent electronics / J.F. Wager, D.A. Keszler, R.E. Presley. - New York: Springer, 2008. – 212 p.

17. Nisha, M. Growth and characteristic of radio frequency magnetron sputtered indium tin oxide thin films: Thesis for the award of the degree of doctor of philosophy. – Kerala, India, 2006. – 198 p.
18. Warschakow, O. Interstitial oxygen in tin-doped indium oxide transparent conductors / O. Warschakow, Lj. Miljadic, D.E. Ellis, G.B. Gonzalez, T.O. Mason // *Journal of the American Ceramic Society* – 2006. – 89. – P. 616–619.
19. Warschkow, O. Defect structure of tin-doped indium oxide / O. Warschkow, D.E. Ellis, G.B. Gonzalez, T.O. Mason // *Journal of the American Ceramic Society*. – 2003. – 86. – P. 1700–1706.
20. Saadeddin, I. Preparation and characterization of new transparent conducting oxides based on SnO₂ and In₂O₃: ceramics and thin films: Ph.D thesis in the field of material science / Iyad Saadeddin. – An-Najah National University, Palestine, 2007. – 191p.
21. Palmer, G.B. Conductivity and transparency of ZnO/SnO₂-cosubstituted In₂O₃ / G.B. Palmer, K.R. Poepelmeier, T.O. Mason // *Chem. Mater.* – 1997. – № 9. – P. 3121.
22. Mohamed, S.H. Properties of Indium Tin Oxide Thin Films Deposited on Polymer Substrates / S.H. Mohamed, F.M. El-Hossary, G.A. Gamal, M.M. Kahlid // *Acta physica polonica A*. – 2009. – V.115, № 3 – P. 704.
23. Pokaipisit, A. Influence of annealing temperature on the properties of ITO films prepared by electron beam evaporation and ion-assisted deposition / A. Pokaipisit, M. Horprathum, P. Limsuwan // *Kasetsart J. (Nat. Sci.)*. – 2008. – № 42. – P. 362.
24. Mohan Babu, P. Bias voltage dependence properties of DC reactive magnetron sputtered indium oxide films / P. Mohan Babu, B. Radhakrishna, G. Venkata Rao, P. Sreedhara Reddy, S. Uthanna // *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*. – 2004. – V.6, № 1. – P. 205.
25. Boonyopakorn, N. Effects of substrate temperature and vacuum annealing on properties of ITO films prepared by radiofrequency magnetron sputtering / N. Boonyopakorn, N. Sripogpun, C. Thanachayanont, S. Dangtip // *Chemical Physics Letters*. – 2010. – V.27, № 10. – P. 103.

26. Wohlmutha, W. Properties of R.F. magnetron sputtered cadmium-tin-oxide and indium-tin-oxide thin films / W. Wohlmutha, I. Adesida // *Thin Solid Films*. – 2005. – № 479. – P. 223.
27. Oka, N. High-rate deposition of high-quality Sn-doped In_2O_3 films by reactive magnetron sputtering using alloy targets / N. Oka, Yu. Kawase, Yu. Shigesato // *Thin Solid Films*. – 2012. – Vol.520. – P. 4101.
28. Balasubramanian, N. Electrical and optical properties of reactively evaporated indium tin oxide (ITO) films dependence on substrate temperature and tin concentration / N. Balasubramanian, A. Subrahmanyam // *Journal of applied physics*. – 1989. – Vol.22. – P. 206.
29. Granqvist C.G. Transparent and conducting ITO films: new developments and applications / C.G. Granqvist, A. Hultaker // *Thin Solid Films*. – 2002. – Vol. 411. – P. 1.
30. Унтила, Г.Г. Влияние концентрации олова на состав, оптические и электрические свойства плёнок ИТО, осажденных методом ультразвукового спрей-пиролиза на кремний и стекло / Г.Г. Унтила, Т.Н. Кост, А.Б. Чеботарева, М.А. Тимофеев // *Физика и техника полупроводников*. – 2012. – Т. 46, № 7. – С. 984.
31. Facchetti, A. *Transparent Electronics: From Synthesis to Applications* / A. Facchetti, T.J. Marks. – USA:Wiley, 2010. – 452 p.
32. Амосова, Л. П. Электрооптические свойства и структурные особенности аморфного ИТО / Л. П. Амосова // *Физика и техника полупроводников*. – 2015. – Том 49, вып. 3 – с.426.
33. Klein, A. Transparent conducting oxides for photovoltaics: manipulation of Fermi level, work function and energy band alignment / A. Klein, A. Wachau, Y. Gassenbauer, S.P. Harvey, D.E. Proffit, T.O. Mason // *Materials*. – 2010. – № 3. – P. 4892.
34. Calnan, S. High mobility transparent conducting oxides for thin film solar cells / S. Calnan, A.N. Tiwari // *Thin Solid Films*. – 2010. – № 518. – P. 1839.

35. Tahar, R.B.H. Tin doped indium oxide thin films: Electrical properties / R.B.H. Tahar, T. Ban, Y. Ohya, Y. Takahashi // *Journal of Applied Physics*. – 1998. – V.83, № 5. – P. 2631.
36. Pasquarelli, R.M. Solution processing of transparent conductors: from flask to film / R.M. Pasquarelli, D.S. Ginley, R. O'Hayre // *Chemical Society Reviews*. – 2011. – № 40. – P. 5406.
37. Haacke, G. New figure of merit for transparent conductors / G. Haacke // *Journal of applied physics*. – 1976. – Vol. 47, № 9. – P. 4086.
38. Gordon, R.G. Criteria for choosing transparent conductors / R.G. Gordon // *MRS Bulletin*. – 2000. – Vol. 25, № 52. – P.52.
39. Марков, Л.К. Применение двухслойных плёнок ИТО в составе отражающих контактов светодиодов синего и ближнего ультрафиолетового диапазонов / Л.К. Марков, И.П. Смирнова, А.С. Павлюченко, М.В. Кукушкин, Д.А. Закгейм, С.И. Павлов // *Физика и техника полупроводников*. – 2014. – Т. 48, вып. 12. – С. 129.
40. Facchetti, A. *Transparent Electronics: From Synthesis to Applications* / A. Facchetti, T.J. Marks. – USA:Wiley, 2010. – P. 452.
41. Mohan Babu, P. Bias voltage dependence properties of DC reactive magnetron sputtered indium oxide films / P. Mohan Babu, B. Radhakrishna, G. Venkata Rao, P. Sreedhara Reddy, S. Uthanna. // *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*. –2004. – V.6, № 1. – P. 205.
42. Жуков, В.В. Распыление мишени при ассистировании магнетронного разряда ионным пучком / В.В. Жуков, В.П. Кривобоков, С.Н. Янин // *Известия Томского политехнического университета*. – 2004. – Т.307, № 7. – С. 40.
43. Данилин, Б.С. Магнетронные распылительные системы / Б.С. Данилин, В.К. Сырчин. – М.: Радио и связь, 1982. –72 с.
44. Лигамет [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.ligamet.org>
45. Бажин, А.И. Влияние режима магнетронного распыления и состава реакционного газа на структуру и свойства плёнок ИТО / А.И. Бажин, А.Н. Троцан,

С.В. Чертопалов, А.А. Стипаненко, В.А. Ступак // Физическая инженерия поверхности. – 2012. – Т. 10, № 4. – С. 342.

46. Legeay, G.A. Gradual annealing of amorphous sputtered indium tin oxide: Crystalline structure and electrical characteristics / G.A. Legeay, X.A. Castel // Thin Solid Films. – 2012. – Vol.520. – P.4121.

47. Meng, L.J. Properties of indium tin oxide (ITO) films prepared by reactive magnetron sputtering at different pressures / L.J. Meng // Thin Solid Films. – 1997. – V.303. – P.151.

48. Tului, M. Indium tin oxide coatings properties as a function of the deposition atmosphere / M. Tului, A. Bellucci, S. Bellini, A. Albolino, G. Migliozzi // Thin Solid Films. – 2012. – Vol.520. – P. 4041.

49. Зуев, Д.А. Импульсное лазерное осаждение тонких плёнок ИТО и их характеристики / Д.А. Зуев, А.А. Лотин, О.А. Новодворский, Ф.В. Лебедев, О.Д. Храмова, И.А. Петухов, Ф.Н. Путилин, А.Н. Шатохин, М.Н. Румянцева, А.М. Гаськов // Физика и техника полупроводников. – 2012. – Т.46, №3. – С. 425.

50. Kim, S.H. Electrical and optical characteristics of ITO films by pulsed laser deposition using a 10 wt.% SnO₂-doped In₂O₃ ceramic target / S.H. Kim, N. Park, T.Y. Kim, G.Y. Sung // Thin Solid Films, 2005. – V. 475. – P.262.

51. Kim, H. Electrical, optical, and structural properties of indium-tin-oxide thin films for organic light-emitting devices / H. Kim, C.M. Gilmore, A. Pique, J.S. Horwitz, H. Mattoussi, H. Murata, Z.H. Kafafi, D.B. Chrisey // Journal of Applied Physics. – 1999. – V.86, № 11. – P. 6451.

52. Ahmed, N.A.G. An improved ion assisted deposition technology for the 21st century / N.A.G. Ahmed // Surface and Coating Technology. – 1995. – V. 71(2). – P. 82.

53. Maensiri, S. Indium oxide (In₂O₃) nanoparticles using Aloe vera plant extract: Synthesis and optical properties / S. Maensiri, P. Laokul, J. Klinkaewnarong, S. Phokha, V. Promarak, S. Seraphin // Journal of optoelectronics and advanced materials. – 2008. – V.10, № 3. – P. 161.

54. Ismail, R.A. High efficiency $\text{In}_2\text{O}_3/\text{c-Si}$ heterojunction solar cells produced by rapid thermal oxidation / R.A. Ismail, D.N. Raouf, D.F. Raouf // *Journal of optoelectronics and advanced materials*. – 2006. – V.8, № 4. – P. 1443.
55. Kerkache, L. Sputtered indium tin oxide thin films deposited on glass substrate for photovoltaic application / L. Kerkache, A. Layadi, F. Hadjersi, A. Gokarna, A. Stolz, M. Halbwaх, J.P. Vilcot, D. Decoster, B. El Zein, S.S. Habib // *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*. Granada (Spain). – 2010.
56. Аксенов, И.И. Покрyтия, полученные конденсацией плазменных потоков в вакууме (способ конденсации с ионной бомбардировкой) / И.И. Аксенов, А.А. Андреев, В.Г. Брень, С.И. Вакула, И.В. Гаврилко, Е.Е. Кудрявцева, В.В. Кунченко, В.В. Локошко, Ю.Т. Мирошниченко, В.Г. Падалка, А.А. Романов, Л.И. Сопрыкин, В.Е. Стрельницкий, В.Т. Толок, В.М. Хороших, И.М. Чикрыжов // *Украинский физический журнал*. – 1979. – т. 24, № 4. – С. 515.
57. Kim, H.J. Electrical, optical, and structural characteristics of ITO thin films by krypton and oxygen dual ion beam assisted evaporation at room temperature / H.J. Kim, J.W. Bae, J.S. Kim, K.S. Kim, Y.C. Jang, G.Y. Yeom, N.E. Lee // *Thin Solid Films*. – 2000. – № 377 – 378. – P. 115–121.
58. Pokaipisit, A. Influence of annealing temperature on the properties of ITO films prepared by electron beam evaporation and ion-assisted deposition / A. Pokaipisit, M. Horprathum, P. Limsuwan // *Kasetsart J. (Nat. Sci.)*. – 2008. – № 42. – P. 362–366.
59. Наумов, В.В. Исследование влияния низкоэнергетической ионной стимуляции на плотность и кристаллическую структуру тонких плёнок / В.В. Наумов, В.Ф. Бочкарев, О.С. Трушин, А.А. Горячев, Э.Г. Хаспнов, А.А. Лебедев, А.С. Куницын // *Журнал технической физики*. – 2001. – Том 71, вып. 8. – С. 92.
60. Manova, D. Thin film deposition using energetic ions / D. Manova, J.W. Gerlach, S. Mandl // *Materials*. – 2010. – № 3. – P. 4109.
61. Майссел Л. Технология тонких плёнок: справочник/ Л. Майссел, Р. Гленг. – Москва: Советское радио, 1970. – Том 1. – 664 с.

62. Schiller, S. On the use of ring gap discharges for high-rate vacuum coating / S. Schiller, U. Heisig, K. Goedicke // *Journal of Vacuum Science & Technology A.* – 1977. – V.14, №3. – P. 815.
63. Великовский, Л.Э. Полевые транзисторы на GaN / Л.Э. Великовский, Д.М. Красовицкий, В.Г. Мокеров, Ю.В. Погорельский, И.А. Соколов, М.В. Степанов, В.П. Чалый, С.П. Яковлев, Н.Н. Базлов // Тезисы докладов всероссийской конференции «НИТРИДЫ ГАЛЛИЯ, ИНДИЯ И АЛЮМИНИЯ - СТРУКТУРЫ И ПРИБОРЫ». МГУ им. Ломоносова, ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН. – 2001. – С. 16.
64. Cao, X.A. Effects of interfacial oxides on Schottky barrier contacts to n- and p-type GaN / X.A. Cao, S.J. Pearton, A.P. Zhang, G.T. Dang, F. Ren, R.J. Shul, L. Zhang, R. Hickman, J.M. Van Hove // *Applied Physics Letters.* – 1999. – V.75. – P. 2569.
65. Margalith, T. Indium tin oxide contacts to gallium nitride optoelectronic devices // T. Margalith, O. Buchinsky, D.A. Cohen, A.C. Abare, M. Hansen, S.P. DenBaars, L.A. Coldren. // *Applied Physics Letters.* – 1999. – V.74. – P. 3930.
66. Morgan, D.V. Annealing Effects on Opto-Electronic Properties of Sputtered and Thermally Evaporated Indium-Tin-Oxide Films / D. V. Morgan, Y. H. Aliyu. R. W. Bunco, A. Salehi // *Thin Solid Films.* – 1998. – V.312. – P. 268.
67. Bellitto, V.J. Transition from the above mentioned gap states RL Henry / V.J. Bellitto, B.D. Thoms, D.D. Koleske, A.E. Wickenden. // *Surface Science.* – 1999. – 80. – P.430.
68. Ishikawa, H. Effects of surface treatments and metal work functions on electrical properties at p-GaN/metal interfaces / H. Ishikawa, S. Kobayashi, Y. Koide, S. Yamasaki, S. Nagai, J. Umezaki, M. Koike, M. Murakami // *Journal of applied physics.* – 1997. – 81(3). – P.1315.
69. Кузьмичев А.И. Магнетронные распылительные системы. Кн. 1. Введение в физику и технику магнетронного распыления / А.И. Кузьмичев // Киев: Аверс, 2008. – 244 с.

70. Смирнова, И.П. AlGaInN-светодиоды с прозрачным р-контактом на основе тонких плёнок ITO / И.П. Смирнова, Л.К. Марков, А.С. Павлюченко, М.В. Кукушкин // *Физика и техника полупроводников*. – 2012. – Т. 46, № 3. – С. 384.
71. Neubert, T. Investigations on oxygen diffusion in annealing processes of non-stoichiometric amorphous indium tin oxide thin films / T. Neubert, F. Neumann, K. Schiffmann, P. Willich, A. Hangleiter // *Thin Solid Films*. – 2006. – V. 513. – P. 319.
72. Habibi, M.H. The effect of annealing on structural, optical and electrical properties of nanostructured tin doped indium oxide thin films / M.H. Habibi, N. Talebian // *Acta Chim. Slov.* – 2005. – V. 52. – P. 53.
73. Paine, D.C. A study of low temperature crystallization of amorphous thin film indium-tin-oxide / D.C. Paine, T. Whitson, D. Janiac, R. Beresford, Cleva Ow Yang, B. Lewis // *J. Appl. Phys.* – 1999. – V.85, N 12. – P. 8446.
74. Zhu, F. Investigation of annealing effects on indium tin oxide thin films by electron energy loss spectroscopy / F. Zhu, C.H.A. Huan, K. Zhang, A.T.S. Wee // *Thin Solid Films*. – 2000. – V.359. – P. 244.
75. Wan, N. Indium tin oxide thin films for silicon-based electroluminescence devices prepared by electron beam evaporation method / Neng Wan, Tao Wang, Hongcheng Sun, Guran Chen, Lei Geng, Xinhui Gan, Sihua Guo, Jun Xu, Ling Xu, Kunji Chen // *J. Non – Crystalline Solids*. – 2010. – V. 356. – P. 911.
76. Alves, S.A. The effects of various annealing regimes on the microstructure and physical properties of ITO (In₂O₃: Sn) thin films deposited by electron beam evaporation for solar energy applications / A.S. Alves, D. Cardoso // *Renewable Energy*. – 2011. – V.36. – P. 1153.
77. Belo, G.S. A simplified reactive thermal evaporation method for indium tin oxide electrodes / G.S. Belo, B.J.P. da Silva, E.A. de Vasconcelos, W.M. de Azevedo, E.F. da Silva Jr. // *Applied Surface Science*. – 2008. – V. 255. – P. 755.
78. Raoufi, D. Multifractal analysis of ITO thin films prepared by electron beam deposition method / D. Raoufi, H.R. Fallah, A. Kiasatpour, A.S.H. Rozatian // *Applied Surface Science*. – 2008. – V.254. – P. 2168.

79. George, J. Electrical and optical properties of electron beam evaporated ITO thin films / J. George, C.S. Menon // *Surface and Coatings Technol.* – 2000. – V.132. – P. 45.

80. Chang, Know-Ming Investigation of indium-tin-oxide ohmic contact to p-GaN and its application to high-brightness GaN-based light-emitting diodes. / Know-Ming Chang, Jiunn-Yi Chu, Chao-Chen Cheng // *Solid-State Electronics.* – 2005. – V.49. – P. 1381–1386.

81. Kim, D.W. A study of transparent indium tin oxide (ITO) contact to p-GaN / D.W. Kim, Y J. Sung, J.W. Park, G.Y. Yeom // *Thin Solid Films.* – 2001. – V. 398 – 399. – P. 87.

82. Жидик, Ю.С. Технология получения электропроводящих плёнок ITO высокой оптической прозрачности с низким значением величины удельного поверхностного сопротивления / Ю.С. Жидик, П.Е. Троян // *Доклады ТУСУР.* – 2012. – №2(26), ч.2. – С. 169.

83. Жидик, Ю.С. Прозрачные электропроводящие покрытия с контролируемыми значениями коэффициента пропускания и поверхностного сопротивления / Ю.С. Жидик, П.Е. Троян, Ю.С. Сахаров // *Доклады ТУСУР.* – 2014. – №1(31). – С. 99.

84. Жидик, Ю.С. Технология синтеза полифункциональных прозрачных электропроводящих плёнок ITO / Ю.С. Жидик, П.Е. Троян, Ю.С. Сахаров // сборник материалов всероссийской научной конференции с международным участием «Полифункциональные химические материалы и технологии», Томск. – 2013. – С. 32.

85. Жидик, Ю.С. Исследование влияния режима магнетронного распыления мишени In(90%)/Sn(10%) на параметры плёнок ITO / Ю.С. Жидик, А.А. Ватюк, Е.Е. Воронюк, П.Е. Троян // сборник материалов XX международной научной конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» СТТ-2014, Томск. – 2014. – с.33.

86. Жидик, Ю.С. Способ формирования прозрачного проводящего покрытия на основе оксида цинка / Ю.С. Жидик, А.А. Ватюк, Е.Е. Воронюк, П.Е.

Троян // сборник материалов всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР – 2014», Томск. – 2014. – С. 143.

87. Жидик, Ю.С. Особенности технологии нанесения токопроводящих слоев оксида индия и олова вакуумно-плазменными методами / Ю.С. Жидик, П.Е. Троян // сборник материалов всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР – 2014», Томск. – 2014. – С. 146.

88. Troyan, P.E. Synthesis of conducting films $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ with the method of magnetron sputtering and their electrophysical properties / P.E. Troyan, Y.S. Zhidik, Y.V. Sakharov // 15th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, Novosibirsk. – a 2014. – P. 98.

89. Сахаров, Ю.В. Исследование механизмов электропроводности плёнок оксида индия, легированного оловом / Ю.В. Сахаров, П.Е. Троян, Ю.С. Жидик // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 3(37). – С. 85.

90. Воротников, М.И. Изучение диэлектрических свойств аморфных плёнок ИТО / М.И. Воротников, Н.И. Зудова, Ю.С. Жидик // материалы всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР – 2016», Томск. – 2016. – С. 166.

91. Жидик, Ю.С. Разработка технологии напыления плёнок ИТО методом магнетронного распыления и ее адаптация в условиях промышленного производства / Ю.С. Жидик, П.Е. Троян, Ю.В. Сахаров // Сборник трудов 5-й международной научно-практической конференции «Технология микро и наноэлектроники в наносистемной технике», Москва. – 2016. – С. 87.

92. Zhidik, Y.S. Deposition of the low resistive ITO-films by means of reactive magnetron sputtering of the In/Sn target on the cold substrate / Y.S. Zhidik, P.E. Troyan, E.V. Baturina, D.V. Korzhenko and Y.N. Yurjev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – V.135, № 1. – P.1.

93. Воротников, М.И. Исследование диэлектрических и электропроводящих свойств аморфных плёнок ИТО / М.И. Воротников, Н.И.

Зудова, Ю.С. Жидик, Е.В. Жидик // Материалы X международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления», Томск. – 2016. – С.88.

94. Чистоедова, А.А. Исследование рельефа и химического состава ИТО до и после отжига / А.А. Чистоедова, Ю.С. Жидик // материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 55-летию ТУСУРа, Томск. – 2017. – Ч. 2. – С. 155.

95. Троян, П.Е. Исследование температурной стабильности характеристик плёнок ИТО для их применения в качестве тонкопленочного прозрачного нагревательного элемента / П.Е. Троян, Е.В. Жидик, Ю.С. Жидик // сборник трудов IV Международной научной конференции студентов и молодых ученых «Молодежь, наука, технологии: новые идеи и перспективы», Томск. – 2017. – С.93.

96. Troyan, P.E. Investigation of Temperature Stability of ITO Films Characteristics / P.E. Troyan, Y.S. Zhidik, E.V. Zhidik // Matec Web of Conference. – 2018 – v. 143.

97. Чистоедова, А.А. Свето пропускающие проводящие покрытия ИТО / А.А. Чистоедова, А.Е. Петрюк, Ю.С. Жидик, С.В. Смирнов // Сборник научных трудов XII Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации», Новосибирск. – 2018. – Ч.3. – С. 285.

98. Жидик, Ю.С. Особенности технологии синтеза прозрачных проводящих оксидных плёнок / Ю.С. Жидик, П.Е. Троян, В.В. Козик // Сборник материалов Международной научной конференции «Полифункциональные химические материалы и технологии», Томск. – 2019. – Т. 1. – С. 54.

99. Kurt J. Lesker: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.lesker.com/newweb/vacuum_systems/deposition_systems_pvd_prolinepvd75.cfm

100. Смирнов, С.В. Методы исследования материалов и структур электроники: учебное пособие / С.В. Смирнов. – Томск: ТУСУР, 2007. – 143 с.

101. Битнер, Л. Р. Материалы электронной техники: учебное пособие / Л.Р. Битнер. – Томск: ТУСУР, 2019. – 108 с.
102. Лучкин, А.Г. Очистка поверхности подложек для нанесения покрытий вакуумно-плазменными методами / А.Г. Лучкин, Г.С. Лучкин // Вестник КГТУ. – 2012. – № 15. – С. 208.
103. Углов, А.А. Адгезионная способность плёнок / А.А. Углов, Л.М. Анищенко, С.Е. Кузнецов. – М.: Радио и связь, 1987. – 104 с.
104. Амосова, Л.П. Магнетронное напыление прозрачных электродов ITO из металлической мишени на холодную подложку / Л.П. Амосова, М.В. Исаев // Журнал технической физики. – 2014. – Т.10, вып.84. – С. 127.
105. Gupta, L. Bandgap narrowing and the band-structure of tin-doped indium oxide films / L. Gupta, A. Mansingh, P.K. Srivastava // Thin Solid Films. – 1989. – 176(1). – P. 33.
106. Кульчин, Ю.Н. Применение критерия Мотта для анализа проводимости в Na-бета-алюминатах, легированных иттрием / Физика твердого тела // Ю.Н. Кульчин, А.А. Пушкин, Ю.Н. Маловицкий, Р.В. Белов, К.Н. Галкин. – 2009. – Т. 51, вып. 8. – С.1530.
107. Паршина, Л.С. Лазерный отжиг тонких плёнок ITO на гибких органических подложка / Л.С. Паршина, О.А. Новодворский, О.Д. Храмова, А.А. Лотин, М.Д. Хоменко, П.А. Щур // Физика и техника полупроводников. – 2019. – Т. 53, вып. 2. – С. 169.
108. Фатеев, М.П. Теория прыжкового переноса в неупорядоченных системах / М.П Фатеев. // Физика твердого тела. – 2010. – Т. 52, вып. 6. – С. 1053.
109. Жидик, Ю.С. Разработка технологий формирований низкоомных омических контактов вертикального светодиода / Ю.С. Жидик, А.А. Ватюк, П.Е. Троян // XIX Международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии», Томск. – 2013. – С. 156.
110. Жидик, Ю.С. Технология формирования покрытий на светодиодных гетероструктурах методом магнетронного распыления на примере нанесения

плёнок ИТО / Ю.С. Жидик, П.Е. Троян // Доклады ТУСУР. – 2014. – № 4(34). – С. 52.

111. Сахаров, Ю.В. Технология синтеза и свойства пористых оксидных плёнок / Ю.В. Сахаров, П.Е. Троян, Ю.С. Жидик // Доклады ТУСУР. – 2015. – №4(38). – С. 72.

112. Данилина, Т.И. Ионно-плазменные методы получения наноструктур / Т.И. Данилина, П.Е. Троян, Ю.В. Сахаров, Ю.С. Жидик // Доклады ТУСУР. – 2017. – № 3(20). –С. 40.

113. Жидик, Ю.С. Исследование влияния бомбардировки полупроводниковых подложек заряженными частицами на изменение их параметров / Ю.С. Жидик, П.Е. Троян, А.А. Чистоедова, Ю.В. Сахаров, А.В. Ильиных // Нанотехнологии: разработка, применение — XXI век. – 2018. – №4. – С. 3.

114. Жидик, Ю.С. Измерение поверхностного сопротивления GaN при напылении тонкопленочных слоев методом магнетронного распыления / Ю.С. Жидик, П.Е. Троян, А.В. Ильиных, Ю.В. Сахаров // сборник трудов XIV международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления», Томск. – 2018. – Ч.1. –С. 68.

115. Zhidik, Y.S. Influence of gas discharge plasma on films of complex composition forming process and properties / Y.S. Zhidik, T.I. Danilina, A.A. Chistoedova, E.V. Zhidik, L.R. Bitner // 14th International Conference "Gas Discharge Plasmas and Their Applications" (GDP 2019), Tomsk. – 2019. – С. 25.

116. Способ напыления тонкопленочных покрытий на поверхность полупроводниковых гетероэпитаксиальных структур методом магнетронного распыления: пат. 2601903 Рос. Федерация. № 2015108566/02 / Троян П.Е., Жидик Ю.С., Гумерова Г.И.; заявл. 11.03.2015; опубл. 10.11.2016 Бюл. № 31.

117. Sakharov, Y.V. Energy efficient sensors based on carbon-modified silica films / Y.V. Sakharov, P.E. Troyan, Y.S. Zhidik // 2019 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2019 – Proceedings, Tomsc.– 2019.

118. Zhidik, E.V. Study and production of thin-film memristors based on TiO_2 - TiO_x layers / E.V. Zhidik, P.E. Troyan, Y.V. Sakharov, Y.S. Zhidik, D.V. Korzhenko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – V.498, № 1.
119. ELCUD [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elcut.ru/>.
120. Битнер, Л.Р. Вакуумная и плазменная электроника: учебное пособие / Л.Р. Битнер. –Томск: Издательство ТУСУРа, 2007 г. – 151 с.
121. Ишуткин, С.В. Плазмохимическое травление InP/InGaAs гетероструктуры в индуктивно-связанной плазме $\text{Cl}_2/\text{Ar}/\text{N}_2$ для формирования оптических волноводных структур / С.В. Ишуткин, В.С. Арыков, Ю.С. Жидик, П.Е. Троян // Доклады ТУСУР. – 2018. – Т. 21, № 4. – С. 28.
122. Ishutkin, S.V. Development of the technology formation of the optical waveguide structures based on InP by plasma etching / S.V. Ishutkin, V.S. Arykov, I.V. Yunusov, M.V. Stepanenko, P.E. Troyan, Y.S. Zhidik // 20th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. – 2019. – p.53.
123. Арыков, В.С. Технология формирования катодной части электрооптического модулятора на основе эффекта Штарка / В.С. Арыков, П.Е. Троян, Ю.С. Жидик // сборник трудов XIII Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления», Томск. – 2017. – С.240.
124. Жидик, Ю.С. Исследование неорганических электрохромных материалов для их использования в иллюминаторах с динамическим затемнением / Ю.С. Жидик, П.Е. Троян, Е.Е. Воронюк. // Вестник МАИ. 2016. – № 2 (23). – С. 160.
125. Жидик, Ю.С. Моделирование вертикального светодиода в рабочем режиме и оценка влияния изменения элементов его конструкции на электрические и оптические характеристики / Ю.С. Жидик, П.Е. Троян // материалы всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР – 2013», Томск. – 2013. – С. 156.
126. Жидик, Ю.С. Технология формирования катодно-анодной части органических светоизлучающих диодов / Ю.С. Жидик, Ю.В. Сахаров, П.Е. Троян

// сборник материалов XI международной конференции «Плёнки и покрытия – 2013», Санкт-Петербург. – 2013. – С. 191.

127. Жидик, Ю.С. Расчет теплоотводящего и несущего покрытия мощного светодиода / Ю.С. Жидик, П.Е. Троян // XVIII Международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии», Томск. – 2012. – С. 53.

128. Жидик, Ю.С. Расчет и анализ распределения температурного поля и механических напряжений в матрице светодиода / Ю.С. Жидик, Н.В. Кайбагоров, П.Е. Троян // материалы всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР – 2012», Томск. – 2012. – С. 162.

129. Жидик, Ю.С. Проблема создания теплоотводящего и несущего покрытия при изготовлении светодиодов / Ю.С. Жидик, П.Е. Троян // материалы всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР – 2011», Томск. – 2011. – С. 81.

130. Жидик, Ю.С. Расчет теплоотводящего и несущего покрытия при изготовлении светодиодов / Ю.С. Жидик, П.Е. Троян, Д.Д. Каримбаев // Доклады ТУСУР. 2011. – №2(24), ч.2. – С. 73.

131. Способ изготовления органического светоизлучающего диода: пат. 2528128 Рос. Федерация. № 2013110202/28 / Жидик Ю.С., Троян П.Е.; заявл. 06.03.2013 ; опубл. 10.09.2014. Бюл. № 25.

132. Тонкопленочный нагревательный элемент: пат. 144827 Рос. Федерация. № 2014109514/07 / Жидик Ю.С., Сахаров Ю.В., Троян П.Е.; заявл. 12.03.2014; опубл. 10.09.2014. Бюл. № 25.

133. Электрооптический модулятор MZM-01: свид. 2018630135 Рос. Федерация. № 2018630114 / Арыков В.С., Жидик Ю.С., Степаненко М.В., Троян П.Е., Юнусов И.В.; заявл. 06.07.2018; опубл. 21.08.2018.

134. Электрооптический модулятор MZM-02: свид. 2018630134 Рос. Федерация. № 2018630115 / Арыков В.С., Жидик Ю.С., Степаненко М.В., Троян П.Е., Юнусов И.В.; заявл. 06.07.2018; опубл. 21.08.2018.

135. Verbist, J. First Real-Time 100-Gb/s NRZ-OOK Transmission over 2km with a Silicon Photonic Electro-Absorption / J. Verbist // Optical Society of America. – 2017. – Th5C. – p.4.
136. Бройдо, В.Л. Вычислительные системы, сети и телекоммуникации: учебник для вузов / В.Л. Бройдо. – СПб.: Питер, 2011 г. – 560с.
137. Никоноров, Н.В. Волноводная фотоника: учебное пособие / Н.В. Никоноров, С.М. Шандаров. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. 143с.
138. Shannon, A. Photonic Integrated Circuit (PIC) Device Structures NASA Electronic Parts and Packaging (NEPP) / A. Shannon // Program NASA Goddard Space Flight Center. – 2016.
139. Kong, S. Fabrication and Experimental Characterization of Multiple Quantum Well Semiconductor Laser Amplifier with Integrated Saturable Absorber [Электронный ресурс] / S. Kong // UCL Discovery. – 2015. – Режим доступа: <http://discovery.ucl.ac.uk/1446375/1/U594090.pdf>
140. Hagn, G. Electro-optic effects and their application in indium phosphide waveguide devices for fibre optic access networks [Электронный ресурс] / G. Hagn // Doctoral Thesis. – 2001. – Режим доступа: <https://www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/146406/eth-25362-02.pdf>.
141. Pleumeekers, J. Manufacturing Progress for InP-based 500 Gb/s Photonic Integrated Circuits / J. Pleumeekers // CS MANTECH Conference, New Orleans, Louisiana, USA. – 2013.
142. Reeves, G.K. Obtaining the Specific Contact Resistance from Transmission Line Model Measurement / G.K. Reeves, H.B. Harrison // IEEE Electron Device Letters. – 1982. – V.3, №5.– P. 111.
143. Бланк Т.В. Механизмы протекания тока в омических контактах металл–полупроводник (обзор) / Т.В. Бланк, Ю.А. Гольдберг // Физика и техника полупроводников. 2017. – № 41(11). – С. 1281.
144. Ramsey, S. Advanced Photonics Packaging and System Integration Services within EURORACTICE [Электронный ресурс] / S. Ramsey. Режим

доступа: http://europractice-ic.com/wp-content/uploads/2019/05/Tyndall_Photonics_Packaging_within_EuroPractice_V1.5.pdf.

145. Шуберт, Ф. Светодиоды / Ф. Шуберт; пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича. – М.: Физматлит, 2008. – 496 с.

146. Харс, Г. Физика тонких плёнок. Современное состояние исследований и технические применения / Г. Харс, Р. Э. Тун; пер. с англ. под ред. М. И. Елинсона и В. Б. Сандомирского. – М.: Мир, 1967. – Т. 2. – 396 с.

147. Берг, А. Светодиоды / А. Берг, П. Дин; пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича. – М.: Мир, 1979. – 687 с.

148. STR [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.str-soft.com/products/SimuLED/>.

149. Physics Summary SpeCLED [Электронный ресурс]. – USA: STR IP Holding. – 2012. – Режим доступа: http://www.str-soft.com/media/SiLENSe_ReleaseNotes.pdf

150. Chang, C.S. InGaN/GaN light-emitting diodes withITO p-contact layers prepared by RF Sputtering / C.S. Chang, S.J. Chang, Y.K. Su // Solid-State Electron. – 2003. – p. 849.

Приложение А. Акты внедрения

"УТВЕРЖДАЮ"
Генеральный директор
ОАО «Тинт-ит»
Липов А.А.
 « 01 » МАРТА 2016 г.

А К Т

об использовании результатов кандидатской диссертационной работы
 «Прозрачные омические контакты для изделий гетероструктурной полупроводниковой оптоэлектроники»
Жидика Юрия Сергеевича

Результаты диссертационной работы «Прозрачные омические контакты для изделий гетероструктурной полупроводниковой оптоэлектроники», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в промышленном производстве электрохромных панелей открытым акционерным обществом «Тинт-ит» при отработке технологии напыления низкомомных пленок ITO на листовое стекло.

Рекомендованы к использованию ОАО «Тинт-ит»:

1. Последовательность отработки технологии напыления пленок ITO методом реактивного магнетронного распыления мишени In/Sn в рабочей смеси газов Ar+O₂;
2. Способ нагрева стеклянных подложек при напылении до температур выше 150°C, приводящий к увеличению проводимости растущих пленок ITO за счет более выраженной поликристаллической структуры;
3. Способ стимуляции роста пленок ITO ионным ассистированием с энергией ионов не менее 50 эВ, приводящей к увеличению проводимости пленок ITO за счет изменения их структуры, обусловленного разрывом или восстановлением химических связей.

Указанные рекомендации позволили значительно снизить удельное поверхностное сопротивление пленок ITO до 10 Ом/□ и повысить воспроизводимость получаемого результата.

Ген. директор
 ОАО «Тинт-ит»



А.А. Липов

Технический директор
 ОАО «Тинт-ит»

Д.А. Плеханов



"УТВЕРЖДАЮ"
 Зам. директора по научной работе
 Института химии растворов им. Г.А. Крестова РАН
 Мамардашвили Н. Ж.
 « 09 » сентября 2019 г.

А К Т

внедрения результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук Жидика Юрия Сергеевича на тему: «Прозрачные омические контакты для изделий гетероструктурной полупроводниковой оптоэлектроники»

Настоящим актом подтверждаем, что результаты диссертационной работы Жидика Ю.С. «Прозрачные омические контакты для изделий гетероструктурной полупроводниковой оптоэлектроники», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы при проведении научных исследований процессов электрополимеризации порфиринов лабораторией «Новых материалов на основе макрогетероциклических соединений» Института химии растворов им. Г.А. Крестова РАН.

При проводимых исследованиях процессов электрополимеризации порфиринов были использованы пленки ИТО, нанесенные на стеклянные подложки по разработанной Жидиком Ю.С. технологии. Данные пленки ИТО показали высокую стойкость к электрохимическому воздействию химических сред и устойчивость к органическим растворителям.

Зав. лабораторией «Новых материалов
 на основе макрогетероциклических соединений»
 Института химии растворов
 им. Г.А. Крестова РАН


 чл.-корр. РАН О.И. Койфман

Главный научный сотрудник лаборатории «Новых материалов
 на основе макрогетероциклических соединений»
 Института химии растворов
 им. Г.А. Крестова РАН


 проф. В. И. Парфенюк

"УТВЕРЖДАЮ"

Директор департамента образования ТУСУР

Сенченко П.В.

10» октября 2019 г.



АКТ

использования в учебном процессе материалов кандидатской диссертации
«Прозрачные омические контакты для изделий гетероструктурной полупроводниково-
вой оптоэлектроники» аспиранта кафедры физическая электроника
Жидика Юрия Сергеевича

Комиссия в составе:

- Воронин А.И., к.т.н., декан факультета электронной техники ТУСУР – председатель комиссии;
 - Данилина Т.И., к.т.н., профессор кафедры ФЭ;
 - Битнер Л.Р., к.т.н., доцент кафедры ФЭ;
 - Каранский В.В., старший преподаватель кафедры ФЭ
- составила настоящий акт о нижеследующем.

Материалы кандидатской диссертации Жидика Ю.С. используются в учебном процессе на факультете электронной техники ТУСУР при чтении курса лекций и проведении лабораторных работ по дисциплине «Вакуумно-плазменные методы получения микро- и наноструктур» для подготовки специалистов по специальностям 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника» и 11.03.04 «Электроника и микроэлектроника».

Полученные при выполнении кандидатской диссертации Жидиком Ю.С. физические основы устранения радиационного воздействия плазмы газового разряда на подложку позволяют студентам ознакомиться с процессом нанесения тонких пленок методом магнетронного распыления на термочувствительные полимерные подложки.

Кроме того, в ходе выполнения диссертационной работы под руководством Жидика Ю.С. по теме диссертации было подготовлено шесть выпускных квалификационных работ студентов на соискание степени бакалавра техники и технологии.

Декан факультета электронной техники ТУСУР,
к.т.н., доцент

Воронин А.И.

Профессор кафедры ФЭ,
к.т.н.

Данилина Т.И.

Доцент кафедры ФЭ,
к.т.н.

Битнер Л.Р.

Старший преподаватель кафедры ФЭ

Каранский В.В.

Приложение Б. Результаты интеллектуальной деятельности

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2528128

**СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО
СВЕТОИЗЛУЧАЮЩЕГО ДИОДА**

Патентообладатель(ли): **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники" (RU)**

Автор(ы): **см. на обороте**

Заявка № **2013110202**

Приоритет изобретения **06 марта 2013 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **16 июля 2014 г.**

Срок действия патента истекает **06 марта 2033 г.**

Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 144827

ТОНКОПЛЕНОЧНЫЙ НАГРЕВАТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники" (ТУСУР) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2014109514

Приоритет полезной модели 12 марта 2014 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 31 июля 2014 г.

Срок действия патента истекает 12 марта 2024 г.

Врио руководителя Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2601903

**СПОСОБ НАПЫЛЕНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ
ПОКРЫТИЙ НА ПОВЕРХНОСТЬ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ
СТРУКТУР МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО
РАСПЫЛЕНИЯ**

Патентообладатель(и): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники" (ТУСУР) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2015108566

Приоритет изобретения **11 марта 2015 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **17 октября 2016 г.**

Срок действия патента истекает **11 марта 2035 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации
топологии интегральной микросхемы

№ 2018630135

«Электрооптический модулятор MZM-01»

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР) (RU)*

Авторы: *Арыков Вадим Станиславович (RU), Жидик Юрий Сергеевич (RU), Степаненко Михаил Валерьевич (RU), Троян Павел Ефимович (RU), Юнусов Игорь Владимирович (RU)*

Заявка № **2018630114**

Дата поступления **06 июля 2018 г.**

Дата государственной регистрации в Реестре топологий интегральных микросхем **21 августа 2018 г.**

Дата окончания срока действия исключительного права **21 августа 2028 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации
топологии интегральной микросхемы

№ 2018630134

«Электрооптический модулятор MZM-02»

Правообладатель: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР) (RU)**

Авторы: **Арыков Вадим Станиславович (RU), Жидик Юрий Сергеевич (RU), Степаненко Михаил Валерьевич (RU), Троян Павел Ефимович (RU), Юнусов Игорь Владимирович (RU)**


Заявка № **2018630115**

Дата поступления **06 июля 2018 г.**

Дата государственной регистрации в Реестре топологий интегральных микросхем **21 августа 2018 г.**

Дата окончания срока действия исключительного права **21 августа 2028 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 **Г.П. Ивлиев**

