

УДК 538.975

На правах рукописи



Жидик Юрий Сергеевич

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

Специальность 01.04.04 – «Физическая электроника»

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Томск – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

Научный руководитель
Троян Павел Ефимович,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:
Семенов Александр Петрович,
доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией физического материаловедения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук

Работкин Сергей Викторович,
кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории прикладной электроники Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук

Ведущая организация:
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.

Защита состоится 27 декабря 2019 г. в 17 ч 00 мин на заседании диссертационного совета Д 212.268.04 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», 634050, г. Томск, пр. Ленина 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» по адресу: г. Томск, ул. Красноармейская, 146, а также на официальном сайте <https://postgraduate.tusur.ru/urls/w2szh62s>.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ю.П. Акулиничев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 – ИТО). Согласно отчету «Touch-Panel-Use Transparent Conductive Film Report – 2013» плёнки ИТО 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 ИТО с указанными характеристиками в сенсорных панелях ограничен размером диагонали 15 дюймов, что обуславливает необходимость уменьшения удельного сопротивления этих плёнок.

Существует много методов нанесения плёнок ИТО: 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 ИТО 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 ИТО 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 плёнок 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 плёнок 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 ИТО при их напылении методом реактивного магнетронного распыления;

5. апробирование разработанных приемов напыления плёнок ИТО 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 ИТО на слой p -InGaAs гетероструктуры формируется омический контакт.

2. Предложена новая методика нанесения оптически прозрачных плёнок ИТО методом магнетронного распыления с уменьшением радиационно-термического воздействия на подложку.

3. Доказано, что отжиг плёнок ИТО при температуре более 300 °С приводит к образованию вырожденного полупроводника n -типа. При этом уровень Ферми занимает положение выше дна зоны 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 ИТО 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 следующих научно-исследовательских работах:

– 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 радиотонного 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 радиофотоники на основе фотонных интегральных схем собственной разработки», выполняемый коллективом научной лаборатории «Лаборатория интегральной оптики и радиофотоники» 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;

– хозяйственная 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 ИТО 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 наноэлектроники 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 ИТО (приготовление экспериментальных образцов плёнок ИТО, 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 ИТО.

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 индексировано базами данных Scopus), 3 патента, 2 свидетельства о регистрации топологий интегральных схем.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследований, показана их новизна, сформулированы цель и задачи работы, показана ее теоретическая и практическая значимость. Представлена структура диссертации, сформулированы выносимые на защиту научные положения.

Первая глава «*Плёнки ИТО: Технология синтеза, структура, свойства*» посвящена обзору литературы по технологии синтеза пленок ИТО, исследованию их структуры и свойств. Показано, что вследствие сочетания оптических и электрических характеристик пленки ИТО являются необходимым и перспективным материалом для изготовления омических контактов приборов оптоэлектроники и радиофотоники. Основная часть научных работ исследовательских коллективов посвящена разработке технологии синтеза плёнок ИТО. Данные по исследованию их электрофизических свойств, механизмов электропроводности и ее природы практически не приводятся. Установлено, что наиболее приемлемым методом синтеза пленок ИТО является магнетронное распыление металлической мишени In/Sn в кислородосодержащей среде. Однако в большинстве случаев данный метод неприменим для нанесения тонких плёнок на поверхность гетероэпитаксиальных полупроводниковых структур пониженной размерности, так как радиационное воздействие газоразрядной плазмы приводит к деградации их свойств.

Во второй главе «*Технология изготовления образцов. Структура и свойства плёнок ИТО*» представлены результаты разработки технологических режимов осаждения низкоомных оптически прозрачных пленок ИТО 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.

Первым этапом диссертационного исследования являлась разработка технологического режима осаждения низкоомных оптически прозрачных пленок ИТО методом реактивного магнетронного распыления. Для этого последовательно проводилась серия экспериментов, связанных с обеспечением оптимальной скорости напыления пленок ИТО и соотношения газов Ar и O₂ в составе рабочей смеси, отрабатывались режимы высокотемпературного отжига плёнок ИТО после их осаждения.

Результатом проведенных исследований стали следующие разработанные технологические режимы осаждения пленок ИТО методом магнетронного распыления металлической мишени In/Sn в кислородосодержащей атмосфере:

- **Технология № 1:** распыление мишени In/Sn в атмосфере O₂(25%)/Ar(75%) в течение 10 мин при токе разряда 0,3 А с последующим отжигом в атмосфере воздуха при температуре 600 °С в течение 20 мин.
- **Технология № 2:** распыление мишени In/Sn в атмосфере O₂(29%)/Ar(71%) в течение 10 мин при токе разряда 0,3 А с последующим отжигом в атмосфере азота при температуре 600 °С в течение 20 мин.

После разработки технологических режимов осаждения низкоомных оптически прозрачных пленок ИТО было проведено исследование их элек-

трофических свойств. В результате установлено, что высокотемпературный отжиг пленок ИТО, проводимый после их осаждения, способствует снижению удельного сопротивления пленок. Снижение удельного сопротивления происходит за счет увеличения концентрации носителей заряда и их подвижности (таблица 1).

Таблица 1 – Электрофизические характеристики пленок ИТО, напыленных по технологиям № 1 и № 2

Параметры пленок		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

Увеличение концентрации свободных носителей, вероятнее всего, связано с тем, что в результате высокотемпературного отжига происходит активация примесных атомов Sn⁴⁺, замещающих атомы In³⁺ в узлах кристаллической решетки ИТО. Одновременно происходит диффундирование из объема плёнки ИТО атомов O²⁻, внедренных между узлами кристаллической решетки или расположенных на границах зерен, что подтверждают микрофотографии поверхности образцов плёнок ИТО до и после отжига (рисунок 1). Показано, что морфология поверхности плёнок ИТО до высокотемпературного отжига неоднородная, с образованием вздутий (рисунок 1,а) вследствие захвата газов при росте плёнки. В процессе отжига пленки происходит выравнивание ее поверхности из-за схлопывания вздутий (рисунок 1,б).

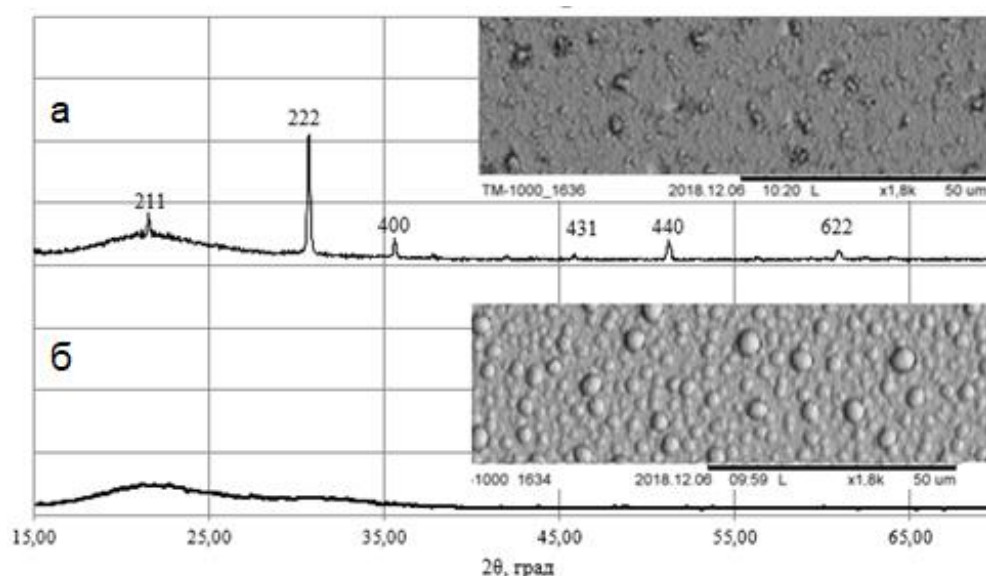


Рисунок 1 – Рентгенограммы образцов пленок ИТО, напыленных по технологии № 2, до (а) и после (б) отжига.

На вставках микрофотографии их поверхности

Образующиеся при отжиге кислородные вакансии и замена трехвалентного индия на атомы четырехвалентного олова в узлах кристаллической решетки действуют как доноры для электронов, увеличивая их концентрацию.

Увеличение подвижности носителей заряда на порядок после проведения высокотемпературного отжига вызвано повышением структурного совершенства плёнок ИТО, что подтверждает рентгенофазовый анализ образцов плёнок ИТО до и после отжига (см. рисунок 1, вставки).

Наряду с электрическими свойствами важным параметром пленок ИТО является спектральная зависимость их коэффициента пропускания, характеризующая прозрачность пленок. Измеренные спектральные зависимости коэффициента пропускания плёнок ИТО, напыленных по разработанным технологиям, представлены на рисунке 2.

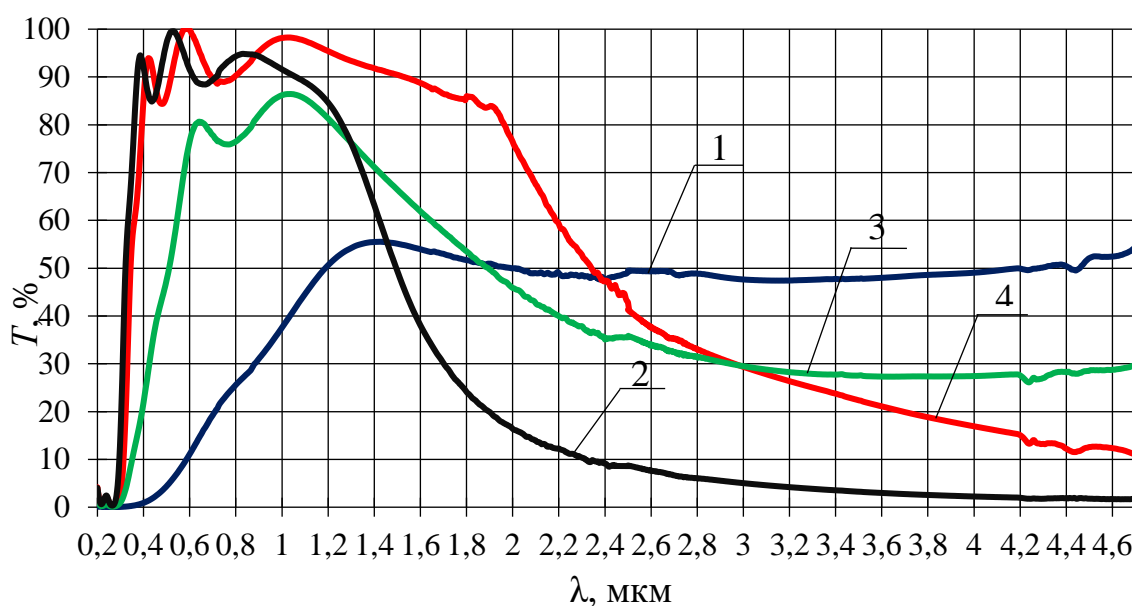


Рисунок 2 – Спектры пропускания плёнок ИТО, напыленных по технологии № 1 без отжига (1) и после отжига (2); по технологии № 2 без отжига (3) и после отжига (4)

Полученные спектральные зависимости показывают, что максимальное пропускание наблюдается в видимом диапазоне длин волн от 400 до 900 нм. Сохранение высокого значения коэффициента пропускания в диапазоне длин волн от 1200 до 1800 нм у плёнок ИТО, напыленных по технологии № 2, после проведения высокотемпературного отжига свидетельствует о возможности их применения в качестве прозрачного контакта для устройств радиофотоники, использующих излучение с длиной волны 1550 нм.

Наряду с исследованиями электрических и оптических свойств плёнок ИТО особую актуальность представляет изучение механизма их электропроводности и изменения энергии активации проводимости. Четкие знания механизма электропроводности плёнок ИТО и взаимосвязи энергии активации проводимости с энергетическими характеристиками примесных атомов необходимы для получения наилучших электрических характеристик плёнок

ITO, синтезированных при различных условиях, а также для формирования приборов твердотельной и оксидной электроники. Исследование механизма электропроводности плёнок ITO проводилось на образцах, изготовленных по технологии № 2, не подвергавшихся отжигу и с проведением отжига в среде азота при температуре 250 °С после напыления пленок (рисунок 3).

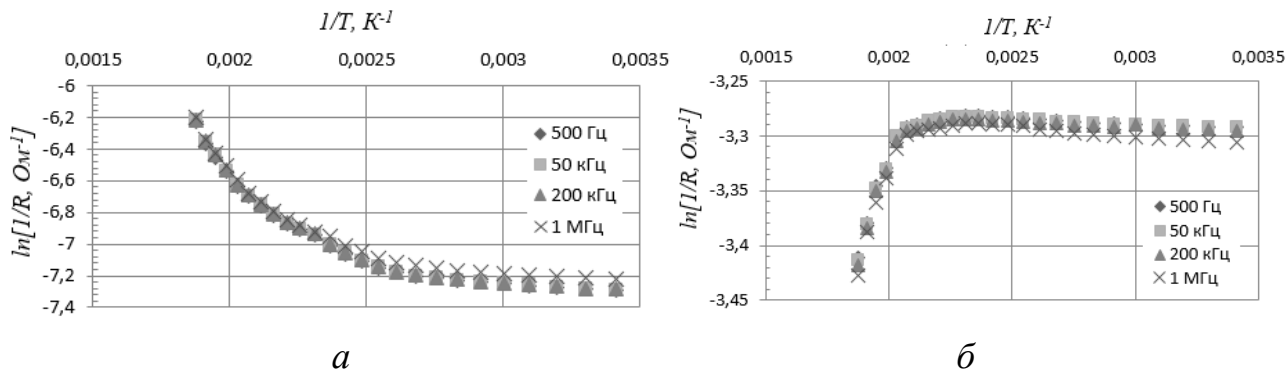


Рисунок 3 – Температурная зависимость электропроводности плёнок ITO до высокотемпературного отжига (а) и после отжига (б)

Анализ кривых на рисунке 3 показывает, что температурная зависимость электропроводности плёнок ITO без отжига имеет возрастающий вид, подобный соответствующей зависимости для высоколегированного примесного полупроводника (рисунок 3,а). Электропроводность образцов плёнок ITO, подвергнутых высокотемпературному отжигу после напыления, с увеличением температуры монотонно возрастает (рисунок 3,б). Однако после нагрева до 400 °С она стремительно снижается, что указывает на кардинальную смену механизма электропроводности, который становится ближе к электропроводности металлов.

Таким образом, исследование температурной зависимости электропроводности плёнок ITO позволило установить смену механизма электропроводности от полупроводникового к металлическому после высокотемпературного отжига при температурах выше 250 °С.

Исследования термо-ЭДС плёнок ITO также показали, что в результате высокотемпературного отжига при температурах выше 250 °С после напыления они становятся вырожденным полупроводником *n*-типа с положением уровня Ферми выше уровня E_C на 0,09 эВ.

Третья глава «Осаждение плёнок ITO методом реактивного магнетронного распыления с устранением радиационного воздействия плазмы магнетронного разряда» посвящена разработке способа осаждения плёнок ITO методом реактивного магнетронного распыления без радиационного и термического воздействия на них плазмы магнетронного разряда. В связи с проблемой дефектообразования в полупроводниковых гетероэпитаксиальных подложках при формировании на их поверхности тонкопленочных структур ионно-плазменными методами в данной главе приводятся результаты экспериментальных исследований эффективности устранения электронно-ионной

бомбардировки поверхности подложки и растущей на ее поверхности плёнки при ионно-плазменном распылении.

Путем моделирования магнетронной распылительной системы и магнитной отклоняющей системы показано, что наиболее эффективной является планарная магнитная отклоняющая система с двумя сонаправленными магнитами, величина магнитной индукции которых в 2 раза меньше величины магнитной индукции магнитов магнетронной распылительной системы.

С учетом результата моделирования сконструирована и изготовлена магнитная отклоняющая система, размещаемая между магнетронной распылительной системой и подложкой и отклоняющая пролетающие через нее заряженные частицы плазмы газового разряда (рисунок 4). Применение указанной отклоняющей системы позволило уменьшить термическое и радиационное воздействие на подложку и растущую на ее поверхности пленку более чем в 13,2 раза. Температура подложки при напылении пленок ИТО в результате применения магнитной отклоняющей системы снизилась на 100–120 °С. Сконструированная магнитная отклоняющая система защищена патентом на изобретение Российской Федерации.

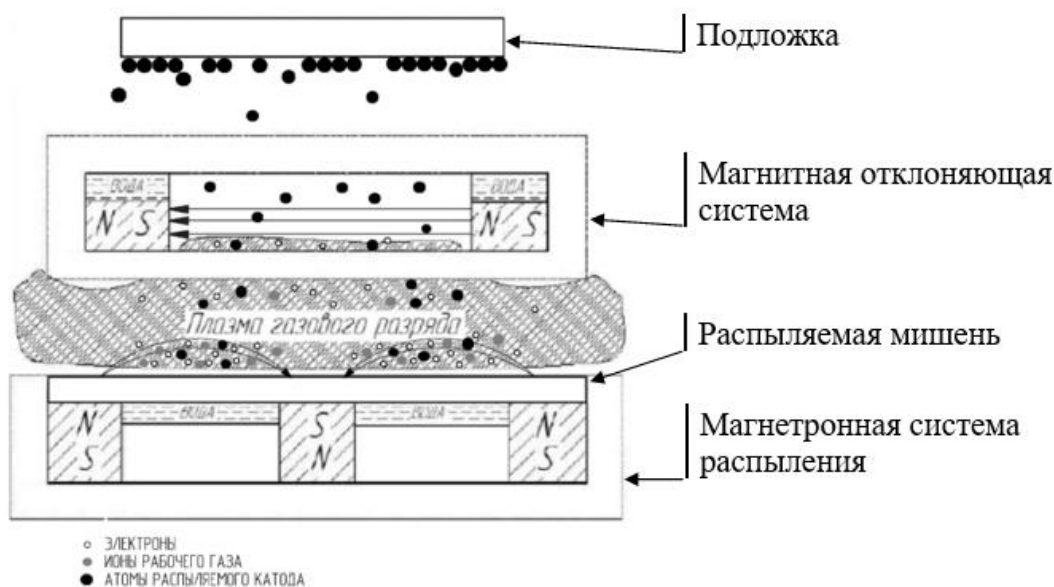


Рисунок 4 – Оснащение магнетронной распылительной системы магнитной отклоняющей системой

Исследования электрофизических характеристик пленок ИТО, напыленных в условиях отклонения заряженных частиц, показали некоторое снижение концентрации носителей заряда, вследствие чего в полтора раза возросло удельное поверхностное сопротивление. Установлено, что рост удельного сопротивления связан с устранением радиационного и термического воздействия на растущую пленку. Несмотря на увеличение удельного поверхностного сопротивления пленок ИТО, остальные электрофизические характеристики (механизм электропроводности, интегральное значение коэффициента пропускания в видимой области, фазовый состав) остаются неизменными. Учитывая, что конечное сопротивление пленок ИТО, напыленных с применением магнитной отклоняющей системы, остается на достаточно низ-

ком уровне, они пригодны для использования в приборах гетероструктурной полупроводниковой оптоэлектроники.

Четвертая глава «Применение плёнок ITO в оптоэлектронных приборах» посвящена исследованиям практического применения плёнок ITO, напыленных по разработанной технологии № 2, в качестве омических контактов к полупроводниковым гетероструктурам на основе соединений группы A_3B_5 при создании оптоэлектронных приборов.

Первым из рассматриваемых оптоэлектронных приборов является радиофотонная интегральная схема электрооптического модулятора (ЭОМ), функционирующего на основе эффекта Штарка и выполненного на гетероструктуре InP/InGaAs. Показано, что контакт ITO/*p*-InGaAs без отжига имеет симметричную относительно начала координат вольт-амперную характеристику (ВАХ), близкую к линейной. После проведения высокотемпературного отжига контакта ITO/*p*-InGaAs ВАХ становится линейной и контактное сопротивление уменьшается (рисунок 5).

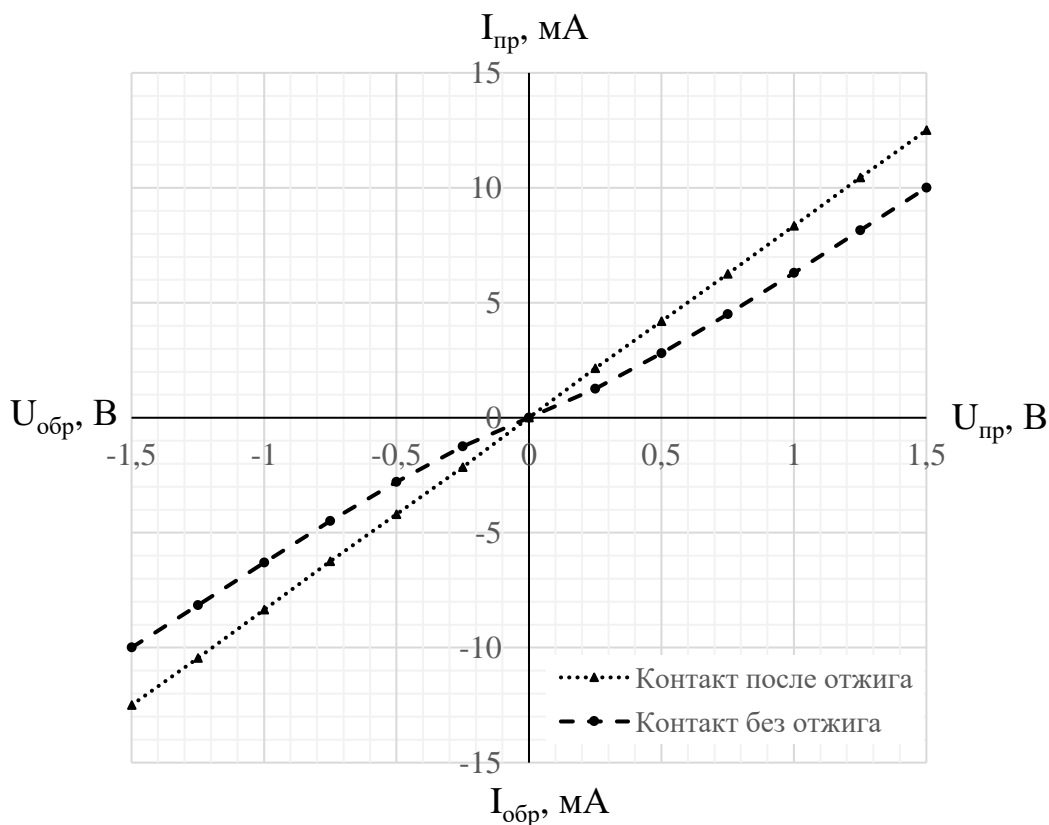


Рисунок 5 – Вольт-амперные характеристики контакта ITO/*p*-InGaAs до и после высокотемпературного отжига

Для анализа омической ВАХ контакта ITO/*p*-InGaAs с учетом параметров обоих материалов, а также с учетом того, что после отжига плёнка ITO является вырожденным полупроводником *n*-типа, построена его зонная энергетическая диаграмма (рисунок 6). Оценка зонной энергетической диаграммы показывает, что вследствие высокой степени легирования обоих контактирующих материалов контактный барьер является достаточно тонким (единицы нм), поэтому можно говорить о туннельном механизме переноса носи-

телей заряда. Подобный механизм токопереноса наблюдается при формировании металлических несплавных омических контактов к p^{++} -GaAs и к p^{++} -InGaAs.

Измерение контактного сопротивления производилось методом TLM. Для установления влияния температуры отжига контактных слоев на изменение контактного сопротивления исследуемые образцы с пленками ИТО, осажденными по технологии № 2 с магнитной отклоняющей системой и без нее, подвергались высокотемпературному отжигу в течение 10 мин при различных температурах. Результаты исследования контактного сопротивления представлены в таблице 2.

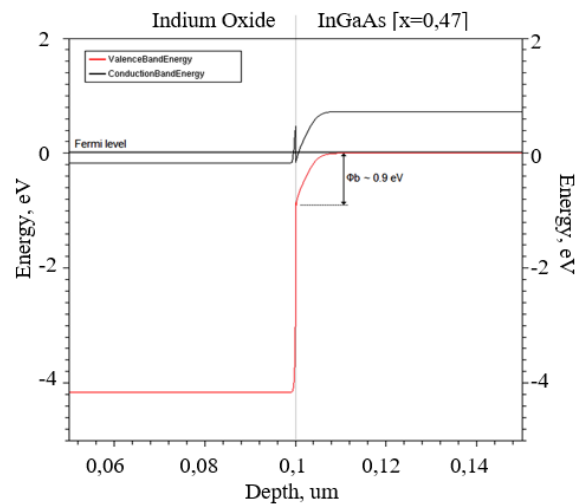


Рисунок 6 – Зонная энергетическая диаграмма контакта ИТО/ p -InGaAs

Таблица 2 – Контактное сопротивление исследуемых образцов при различной температуре отжига

Температура отжига контакта, °C	Контактное сопротивление, Ом·см ²		
	Ti/Pt/Au/ p -InGaAs	ИТО/ p -InGaAs (напыление без отклоняющей системы)	ИТО/ p -InGaAs (напыление 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	$6,90 \cdot 10^{-6}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$

Анализ полученных значений контактного сопротивления контактов ИТО/ p -InGaAs показывает их применимость в качестве омических контактов для ЭОМ на основе гетероструктур InP/InGaAs. Наименьшим контактным сопротивлением обладают контакты ИТО/ p -InGaAs, полученные при температуре отжига 300 °C, с плёнками ИТО, осажденными без отклоняющей системы, что обусловлено их меньшим удельным сопротивлением. Установлено, 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. Таким образом, применение пленок ИТО в качестве контактного слоя к слою p -InGaAs при формировании ЭОМ позволяет получить омический контакт с контактным сопротивлением на уровне 10^{-4} – 10^{-5} Ом·см².

Результаты исследования характеристик омического контакта ИТО/ p -InGaAs, а также результаты отработки технологии плазмохимического травления гетероструктуры InP/InGaAs в индуктивно связанной плазме Cl₂/Ar/N₂ для формирования оптических волноводных структур позволили разработать технологический маршрут изготовления ЭОМ, функционирую-

щих на основе эффекта Штарка, с использованием технологии самосовмещенного с волноводом омического контакта.

Далее в главе 4 рассматривается применение пленок ИТО, а также пленок других оксидов (TiO_2 , SiO_2 и др.) в качестве согласующего (антиотражающего) слоя для введения светового излучения из оптоволоконной линии в полупроводниковый волновод (рисунок 7). Проведенные расчёты антиотражающих покрытий для различных подложек показали возможность использования оксидных пленок для решения этой задачи. 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.

Данный подход, устраняющий преломление светового излучения, был реализован при вводе излучения в полупроводниковый волновод радиочастотной интегральной схемы оптического приемника на основе монолитной 0,25 мкм SiGe BiCMOS технологии (рисунок 8).

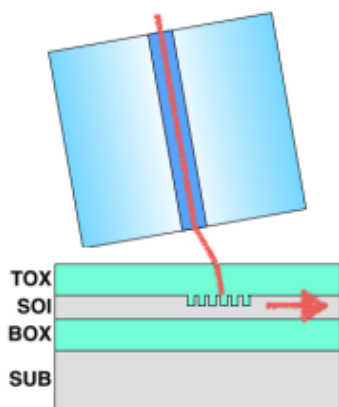


Рисунок 7 – Преломление светового луча при заведении излучения в полупроводниковый волновод

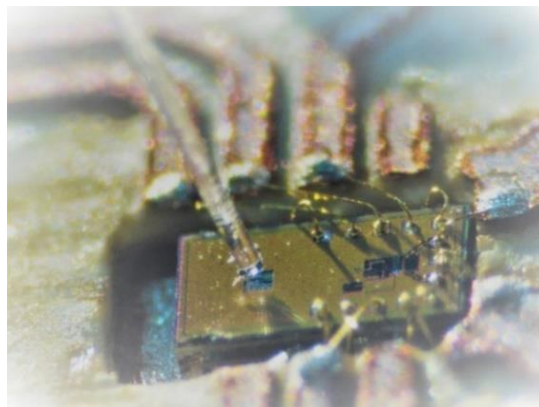


Рисунок 8 – Фотография кристалла интегрального оптического приемника на печатной плате с подведённым оптическим волокном

В заключительной части четвертой главы излагаются результаты моделирования светодиода планарной конструкции, в котором в качестве слоя растекания тока использовалась пленка ИТО. Проведенное моделирование показало, что введение пленки ИТО способствует увеличению КПД светодиода более чем на 50%. При этом напыление пленок ИТО магнетронной распылительной системой с магнитной отклоняющей системой, описанной в главе 3, дает возможность уменьшить радиационное воздействие плазмы магнетронного разряда на гетероструктуру светодиода.

Помимо применения плёнок ИТО в составе оптоэлектронных приборов, они успешно были применены в качестве прозрачных проводящих электродов различных электротехнических устройств:

- органических светоизлучающих диодов;
- электрохромных панелей и устройств;
- тонкопленочных нагревательных элементов.

Основные результаты и выводы

В диссертационном исследовании 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. Разработана технология осаждения низкоомных оптически прозрачных плёнок ИТО с удельным сопротивлением ниже 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 после их осаждения способствует снижению удельного сопротивления плёнок. Экспериментально показано, что после проведения высокотемпературного отжига примесь в пленках ИТО становится полностью электрически активной, вследствие чего увеличивается концентрация электронов проводимости.

2. Экспериментально установлена смена механизма электропроводности плёнок ИТО от полупроводникового к металлическому при проведении высокотемпературного отжига при температурах выше 250 °С. Показано, что в результате высокотемпературного отжига плёнка ИТО становится вырожденным полупроводником *n*-типа с положением уровня Ферми выше уровня E_C на $0,09$ эВ.

3. Создана магнитная отклоняющая система, размещаемая между магнетронной распылительной системой и подложкой, 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 за счет снижения электронного потока.

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 сопротивления 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. Однако при исследовании 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%.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК

1. Ишуткин С.В. Плазмохимическое травление InP/InGaAs гетероструктуры в индуктивно связанной плазме Cl₂/Ar/N₂ для формирования оптических волноводных структур / С.В. Ишуткин, В.С. Арыков, Ю.С. Жидик, П.Е. Троян // Доклады ТУСУР. – 2018. – Т. 21, № 4. – С. 28–32.

2. 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. 3–8.

3. Данилина Т.И. Ионно-плазменные методы получения наноструктур / Т.И. Данилина, П.Е. Троян, Ю.В. Сахаров, Ю.С. Жидик // Доклады ТУСУР. – 2017. – № 3, Т. 20. – ISSN 1818-0442. – С. 40–45.

4. 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. – М., 2016. – Т. 23, № 2. – С. 160–166.

5. Сахаров Ю.В. Исследование механизмов электропроводности пленок оксида индия, легированного оловом / Ю.В. Сахаров, П.Е. Троян, Ю.С. Жидик // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 3(37). – ISSN 1818-0442. – С. 85–88.

6. Сахаров Ю.В. Технология синтеза и свойства пористых оксидных пленок / Ю.В. Сахаров, П.Е. Троян, Ю.С. Жидик // Доклады ТУСУР. – 2015. № 4(38). – ISSN 1818-0442. – С. 72–75.

7. Жидик Ю.С. Технология формирования покрытий на светодиодных гетероструктурах методом магнетронного распыления на примере нанесения пленок ITO / Ю.С. Жидик, П.Е. Троян // Доклады ТУСУР. – 2014. – № 4(34). – ISSN 1818-0442. – С. 52–55.

8. 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). – ISSN 1818-0442. – С. 99–102.

9. Жидик Ю.С. Технология получения электропроводящих пленок ITO высокой оптической прозрачности с низким значением величины удельного поверхностного сопротивления / Ю.С. Жидик, П.Е. Троян // Доклады ТУСУР. – 2012. – № 2(26), ч. 2. – ISSN 1818-0442. – С. 169–171.

10. 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. – ISSN 1818-0442. – С. 73–76.

Статьи в рецензируемых журналах, индексируемых в базе данных Scopus

11. Zhidik E.V. Study and production of thin-film memristors based on TiO₂ – TiO_x layers / E.V. Zhidik, P.E. Troyan, Y.V. Sakharov, Y.S. Zhidik, D.V. Kor-

zhenko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 498, No 1.

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

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

14. Zhidik E.V. 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, Y.N. Yurjev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 135, No 1. – P. 1–5.

15. 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, June 30 – July 4, 2014. – 2014. – P. 98–104.

Результаты интеллектуальной деятельности

16. 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.

17. 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.

18. 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.

19. 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.

20. 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.

Статьи в журналах, сборниках научных трудов и материалов научных и научно-практических конференций

21. Жидик Ю.С. Особенности технологии синтеза прозрачных проводящих оксидных пленок / Ю.С. Жидик, П.Е. Троян, В.В. Козик // Сборник материалов Международной научной конференции «Полифункциональные химические материалы и технологии», 22–25 мая 2019 г. – Томск: Офсет Центр, 2019. – Т. 1. – С. 54–56.

22. Чистоедова А.А. Свето пропускающие проводящие покрытия ITO / А.А. Чистоедова, А.Е. Петрюк, Ю.С. Жидик, С.В. Смирнов // Сборник научных трудов XII Всероссийской научной конференции молодых ученых

«Наука. Технологии. Инновации», 03–07 декабря 2018 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – Ч. 3. – С. 285–289.

23. 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» (ЭССУ-2018), Томск, 28–30 ноября 2018 г. – Томск: В-Спектр, 2018. – Ч. 1. – С. 68–70.

24. 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» (ЭССУ-2017), Томск, 29 ноября – 1 декабря 2017 г.

25. Троян П.Е. Исследование температурной стабильности характеристик пленок ITO 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» (МНТ-2017), Томск, 25–27 октября 2017 г.

26. Чистоедова А.А. Исследование рельефа и химического состава ITO 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, 10–12 мая 2017 г.: в 8 ч. – Томск: В-Спектр, 2017. – Ч. 2. – С. 155–157.

27. Воротников М.И. Исследование диэлектрических и электропроводящих свойств аморфных пленок ITO / М.И. Воротников, Н.И. Зудова, Ю.С. Жидик, Е.В. Жидик // Материалы X международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления», Томск, 16–18 ноября 2016 г.

28. Жидик Ю.С. Разработка технологии напыления пленок ITO 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, ИНМЭ, 13–15 апреля 2016 г. – 2016. – С. 87–87.

29. Воротников М.И. Изучение диэлектрических свойств аморфных пленок ITO / М.И. Воротников, Н.И. Зудова, Ю.С. Жидик // Материалы всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР – 2016», Томск, 25 – 27 мая 2016 г.

30. 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, 14–16 мая 2014 г. – 2014. – С. 146–149.

31. Жидик Ю.С. Исследование влияния режима магнетронного распыления мишени In(90%)/Sn(10%) на параметры пленок 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, 14–18 апреля 2014 г.

32. 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, 14–16 мая 2014 г. – 2014. – С. 143–146.

33. Жидик Ю.С. Технология синтеза полифункциональных прозрачных электропроводящих пленок ITO / Ю.С. Жидик, П.Е. Троян, Ю.С. Сахаров // Сборник материалов всероссийской научной конференции с международным участием «Полифункциональные химические материалы и технологии», Томск, 21–23 ноября 2013 г. – 2013. – С. 32–33.

34. Жидик Ю.С. Получение низкоомных пленок оксида индия, легированных оловом, и измерение их основных параметров / Ю.С. Жидик, Ю.В. Сахаров, П.Е. Троян // Сборник материалов 18-го международного молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке», Харьков, 14–16 апреля 2014 г. – 2014. – С. 41–42.

35. Жидик Ю.С. Разработка технологий формирования 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, апрель 2013 г. – 2013. – С. 156–157.

36. 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, май 2013 г. – 2013. – С. 156–159.

37. 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» СТТ-2012, Томск, апрель 2012 г. – 2012. – С. 53–54.

38. 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, май 2012 г. – 2012. – С. 162–164.

39. 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, 4–6 мая 2011. – 2011. – С. 81–83.