

На правах рукописи



Жидик Юрий Сергеевич

**СИНТЕЗ, ОПТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ТОНКИХ ПЛЕНОК ОКСИДА ИНДИЯ-ОЛОВА И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ
В ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВАХ**

Специальность 1.3.5 – Физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Томск – 2026

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

Научный консультант –

Троян Павел Ефимович,

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры Физической электроники
ТУСУР.

Официальные оппоненты:

Асваров Абил Шамсудинович,

доктор физико-математических наук, ведущий
научный сотрудник Курчатовского комплекса
кристаллографии и фотоники Национального
исследовательского центра «Курчатовский
институт», г. Москва;

Каманина Наталия Владимировна,

доктор физико-математических наук, старший
научный сотрудник, начальник отдела «Фотофизика
наноструктурированных материалов и устройств»
Акционерного общества «Научно-производственное
объединение Государственный оптический институт
им. С. И. Вавилова», г. Санкт-Петербург;

Коваль Николай Николаевич,

доктор технических наук, профессор, главный
научный сотрудник лаборатории плазменной
эмиссионной электроники Федерального
государственного бюджетного учреждения науки
Институт сильноточной электроники Сибирского
отделения Российской академии наук, г. Томск.

Ведущая организация –

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский
государственный университет
им. Н.И. Лобачевского», г. Нижний Новгород.

Защита состоится 28 декабря 2026 г. в 15 часов 00 минут на заседании
диссертационного совета 24.2.415.03, созданного на базе ТУСУРа, по адресу: 634050,
г. Томск, пр. Ленина, 40, каб. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУРа (г. Томск,
ул. Красноармейская, 146) и на сайте ТУСУРа:
<https://postgraduate.tusur.ru/urls/ipv1971m>.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета, канд. техн. наук



Казаков Андрей Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современное стремительное развитие приборов и устройств оптоэлектроники, радиофотоники и гибкой электроники неразрывно связано с поиском новых материалов и модификацией свойств известных материалов, способных одновременно обеспечивать высокую прозрачность в оптическом диапазоне и низкое удельное электрическое сопротивление. К такому классу материалов относятся прозрачные проводящие оксиды (Transparent Conductive Oxides, TCO). Особым образом из материалов TCO выделяют покрытия оксида индия-олова (Indium Tin Oxide, ITO), обладающие рекордно низким удельным электрическим сопротивлением среди класса прозрачных проводящих оксидов (на уровне 10^{-4} Ом·см), при этом имеющие прозрачность до 90% в видимом диапазоне спектра, которая снижается в ИК-области спектра. Кроме того, им присуща также химическая стабильность и технологичность. ITO является наиболее доступным TCO-материалом на рынке и находит применение в солнечных элементах, плоских OLED- и жидкокристаллических дисплеях, сенсорных экранах и лазерной технике, а также в фотоэлектрических и оптоэлектронных приборах, включая прозрачные p-n-переходы.

В промышленности, начиная с 1968 года, когда ITO как материал был впервые получен, прежде всего используются относительно толстые (толщиной более 0,5–1 мкм) покрытия ITO, тогда как свойства тонких пленок ITO (толщиной до 100 нм) на сегодняшний день изучены недостаточно. Этим обусловлена актуальность разработки технологии синтеза и исследования свойств именно тонких пленок. Снижение толщины ITO в значительной степени позволяет влиять на их электрические и оптические свойства, повысить их оптическое пропускание за счет снижения поглощения в материале и интегрировать ITO в миниатюрные устройства оптоэлектроники и радиофотоники. Кроме того, в ближнем инфракрасном диапазоне тонкие пленки ITO демонстрируют близкое к нулевому значение действительной части относительной диэлектрической проницаемости (ϵ -near-zero, ENZ), что открывает новые возможности для создания метаповерхностей и устройств нанофотоники. Ультратонкие пленки ITO с управляемым режимом околонулевого показателя преломления могут быть эффективно использованы в телекоммуникационном диапазоне для нанопотонных устройств.

В последнее время разными коллективами все чаще сообщается об обнаружении и исследовании новых перспективных для практического использования свойств тонких пленок ITO: фотоэлектрического и фотоманитного отклика при облучении УФ-излучением, модуляции показателей преломления и поглощения под действием электрического поля и т.д. Комплексные исследования оптических и электрических свойств пленок ITO способствуют разработке на их основе перспективных элементов тонкопленочной оксидной электроники, оптоэлектроники и радиофотоники.

Конкретные свойства пленок ITO сильно зависят от технологии их осаждения. Тонкие пленки ITO могут быть получены различными методами, такими как термическое испарение в вакууме, магнетронное распыление, золь-гель метод, химическое осаждение из паровой фазы, электронно-лучевое испарение и распылительный пиролиз. Перспективным методом осаждения пленок ITO, позволяющим в широких пределах влиять на их свойства, является магнетронное распыление мишени In/Sn в кислородосодержащей атмосфере. Следовательно, в научном и прикладном аспекте важны обобщенные исследования влияния технологии синтеза тонких плёнок ITO методом реактивного магнетронного распыления мишени In/Sn на их электрические и оптические свойства. В частности, для пленок малой

толщины в процессе синтеза критически необходимо обеспечить формирование кислородных вакансий, активацию примесных атомов олова и формирование поликристаллической структуры, что в совокупности определяет уровень удельного сопротивления и оптической прозрачности.

В связи с вышеизложенным разработка технологических основ синтеза тонких низкоомных оптически прозрачных пленок ИТО с управляемыми характеристиками методом магнетронного распыления и исследование их свойств применительно к конкретным устройствам электроники является научной проблемой, имеющей важное хозяйственное значение для отечественной электронной промышленности, а тематика диссертационной работы представляется актуальной.

Степень разработанности темы

Отработке технологии осаждения пленок ИТО методом реактивного магнетронного распыления посвятили свои работы Г.Г. Унтила, Л.П. Амосова, И.П. Смирнова, Л.К. Марков, О.А. Новодворский, Р.М. Закирова, А.И. Бажин, D.V. Morgan, P. Mohan Babu, G.A. Legeay, S.H. Kim.

Исследованием оптических и электрофизических свойств тонких пленок ИТО занимались прежде всего зарубежные учёные G.Falk, J.H.W. De Wit, J.F. Wager, M. Nisha, M. Marezio, I. Saadeddin, A. Pokaipisit, N. Boonyopakorn, P.M. Woodward, а среди отечественных исследователей значимый вклад в их развитие внесли Н.В. Каманина, В.А. Шалыгин, И.А. Тамбасов, Е.А. Гусева (Форш), А.С. Ильин, Н.Ю. Снежко, А.С. Бабулин.

Известными исследователями элементов и материалов для оксидной электроники являются А.Ш. Асваров, В.Н. Комащенко, S. Brotherton, A. C. Adams, K. Nakazawa, T. Miyasako, L. Zhang, S. Li.

Отработка технологических режимов и модернизация технологии осаждения пленок ИТО для различных практических применений в Томске ведётся несколькими коллективами: в ТУСУРе на кафедре физической электроники под руководством П.Е. Трояна, в научно-образовательном центре Б.П. Вейнберга НИ ТПУ – коллективом под руководством В.П. Кривобокова, в Институте сильноточной электроники СО РАН – С.В. Работкиным. Несмотря на широту использования пленок ИТО, обобщенные комплексные исследования их свойств отсутствуют. Между тем совокупность научных результатов таких исследований может значительно способствовать разработке на основе ИТО перспективных элементов электроники.

Цель работы – разработка технологических основ синтеза тонких низкоомных оптически прозрачных плёнок ИТО методом магнетронного распыления, комплексное исследование их оптических и электрофизических свойств, а также формирование на их основе многофункциональных покрытий для создания приборов оптоэлектроники и радиофотоники.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих **задач**:

1) на основании физико-химической и технологической проработки разработать технологические основы синтеза тонких плёнок ИТО с удельным сопротивлением менее $5 \cdot 10^{-4}$ Ом·см при интегральном коэффициенте пропускания в видимой области более 85% методом реактивного магнетронного распыления;

2) провести комплексные исследования физических (атомно-кристаллическая структура, морфология поверхности, фазовый состав), оптических (пропускание, отражение и поглощение излучения) и электрических (тип проводимости, зонно-энергетические характеристики, удельное сопротивление, параметры носителей заряда) свойств тонких плёнок ИТО;

3) провести исследование взаимосвязи электрических и оптических свойств пленок ИТО при изменении концентрации носителей заряда в их объеме с целью создания приборов оптоэлектроники и радиофотоники;

4) провести исследование фотоиндуцированных процессов в пленках ИТО при воздействии УФ-излучения;

5) оценить возможности применения плёнок ИТО для создания оптоэлектронных и радиофотонных приборов.

Достижение поставленной цели решает научную проблему, имеющую важное хозяйственное значение и заключающуюся в разработке технологии осаждения тонких пленок ИТО методом магнетронного распыления с контролируемыми электрическими и оптическими характеристиками и их применении для нужд предприятий электронной промышленности.

Научная новизна заключается в следующем (оригинальные результаты соответствуют пунктам 1 и 2 паспорта научной специальности 1.3.5. Физическая электроника в части разработки технических основ приборов, установок, систем и технологических процессов, в области твердотельной электроники, полупроводниковой электроники и оптоэлектроники, а также в части практического применения физических явлений в твердотельных микро- и наноструктурах и полупроводниковых пленках).

1. *Разработана* качественная модель синтеза пленок ИТО с низким удельным сопротивлением методом реактивного магнетронного распыления, описывающая происходящие физические процессы при их осаждении. Синтез оптически прозрачных тонких пленок ИТО с высокой электропроводностью методом реактивного магнетронного распыления мишени In (90%)/Sn (10%) должен осуществляться при токе разряда 0,3 А, парциальных давлениях аргона $3,7 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. и кислорода $5,2 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст., температуре подложки в процессе осаждения выше 300 °С с последующим отжигом в вакууме при температуре 450 °С в течение 20 мин. Последующий после осаждения высокотемпературный отжиг пленок ИТО в бескислородной среде приводит к формированию кислородных вакансий, активации примесных атомов олова, а также к формированию поликристаллической структуры пленки.

2. *Разработаны* физические и технологические основы осаждения оптически прозрачных тонких пленок ИТО методом реактивного магнетронного распыления, *отличающиеся* тем, что позволяют целенаправленно управлять структурой осаждаемых пленок ИТО, их электрическими и оптическими свойствами.

3. *Впервые получены* комплексные научные знания о влиянии парциального давления кислорода в составе рабочей атмосферы на структурные, электрофизические и оптические свойства тонких плёнок ИТО, синтезированных методом реактивного магнетронного распыления мишени In/Sn.

4. *Установлены* граничные условия эффективного взаимодействия электрического поля и свободных носителей заряда в тонких пленках ИТО позволяющие использовать ИТО в качестве канального слоя тонкопленочного транзистора и плазмонного слоя адсорбционного электрооптического модулятора: толщина пленок ИТО не более 30 нм, концентрация носителей заряда в ИТО на уровне 10^{18} см^{-3} , напряженность внешнего электрического поля более 10^5 В/см .

5. *Установлена* роль УФ-излучения при обработке пленок ИТО, заключающаяся в разрушении в приповерхностном слое химических связей In – О, приводящая к повышению концентрации кислородных вакансий, а также в генерации

дополнительных носителей заряда за счет тепловой ионизации примесных атомов олова.

6. *Предложена новая технология формирования оптически прозрачного слоя растекания тока на основе In+Sn/ITO к слою p-GaN светодиодной гетероструктуры InGaN/AlGaIn/GaN, позволяющего увеличить КПД светодиода более чем в 2 раза за счет равномерного растекания тока по всей светодиодной гетероструктуре, а также за счет устранения отражения сгенерированного оптического излучения от поверхности применявшихся ранее традиционных металлических контактов к слою p-GaN.*

Теоретическая значимость работы

1. *Установлены и сформулированы новые научные знания о физических и технологических процессах синтеза тонких пленок ITO методом реактивного магнетронного распыления мишени In/Sn в кислородосодержащей атмосфере при разном парциальном давлении кислорода.*

2. *Получены новые научные знания об электрофизических и оптических свойствах тонких плёнок ITO, синтезированных методом реактивного магнетронного распыления мишени In/Sn в кислородосодержащей атмосфере при разном парциальном давлении кислорода.*

3. *Проанализированы и систематизированы результаты существующих исследований и дополнены новыми, полученными автором диссертации сведениями о процессах в тонких пленках ITO, происходящих при внешних воздействиях.*

Практическая значимость работы

1. Полученные результаты имеют важное хозяйственное значение, заключающееся в создании научных основ синтеза электропроводящих оптически прозрачных тонких пленок ITO методом магнетронного распыления с контролируемыми и управляемыми электрическими и оптическими характеристиками.

2. Проведены комплексные исследования оптических и электрических свойств тонких пленок ITO с разным содержанием кислорода и показана перспектива их применения в устройствах оптоэлектроники и радиофотоники (светоизлучающие диоды, тонкопленочные транзисторы, электрооптические модуляторы), а также возможность использования пленок ITO в качестве функциональных покрытий для изделий электроники (сенсоры УФ-излучения, газовые сенсоры, покрытие для экранирования микроволнового излучения, тонкопленочный нагревательный элемент, антистатическое покрытие для терморегулирующих элементов космических аппаратов).

3. Результаты работы использованы рядом промышленных предприятий и научных организаций (АО «НИИПП», ООО «ДЕФАН», ООО НПК «ТЕСАРТ», ООО «Лаборатория 23», ИПУ РАН, ИОНХ РАН, ИХР РАН, ТУСУР, ТГУ), а также при выполнении научных проектов (ФЦП, госзадания, гранты РФФИ и РНФ, Постановление Правительства РФ № 218).

Методология 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, рентгеновской дифрактометрии, исследований поверхности методами растровой электронной микроскопии и сканирующей зондовой микроскопии). Обработка экспериментальных данных проводилась с использованием специализированных программ.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Синтез тонких пленок ИТО с высокой электропроводностью методом реактивного магнетронного распыления осуществляется при распылении металлической мишени In(90%)/Sn(10%) в смеси газов Ar (при парциальном давлении $3,7 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.) и O₂ (при парциальном давлении $5,2 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст.), температуре подложки 350 °С, токе разряда 0,3 А с последующим отжигом в вакууме при температуре 450 °С в течение 20 мин. В процессе высокотемпературного отжига проходит формирование кислородных вакансий, активация примесных атомов олова, а также формирование поликристаллической структуры пленки. Вследствие этого концентрация носителей заряда увеличивается с $6,11 \cdot 10^{20}$ см⁻³ до $7,8 \cdot 10^{20}$ см⁻³, что подтверждает роль кислородных вакансий в процессе электропроводности ИТО, а их подвижность увеличивается с 8,9 до 32,1 см²/(В·с) за счет формирования поликристаллической структуры. Результатом описанных процессов является обеспечение удельного сопротивления ИТО менее $5 \cdot 10^{-4}$ Ом·см.

2. Пленки ИТО, осажденные методом реактивного магнетронного распыления по разработанной технологии, являются вырожденным полупроводником n-типа проводимости с положением уровня Ферми на (0,09–0,125) эВ выше дна зоны проводимости, удельным сопротивлением менее $5 \cdot 10^{-4}$ Ом·см, эффективной массой носителей заряда (0,36–0,38)·m₀, коэффициентом пропускания в видимой области спектра на уровне 80–90%, показателем преломления в видимой области спектра в диапазоне от 1,82 до 2,17.

3. При парциальном давлении напускаемого в зону распыления мишени In(90%)/Sn(10%) аргона $3,7 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст., температуре подложки во время осаждения 350 °С путем варьирования парциального давления напускаемого кислорода в диапазоне $2,2 \cdot 10^{-4}$ – $3,2 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. и режима последующего после осаждения пленки ИТО отжига можно целенаправленно получить концентрацию электронов проводимости в тонких пленках ИТО в диапазоне значений от $3 \cdot 10^{19}$ до $9 \cdot 10^{20}$ см⁻³. Нижнее значение концентрации электронов может быть уменьшено на порядок путем их анодирования. Воздействие внешнего электрического поля напряженностью более 10^5 В/см на тонкие пленки ИТО с концентрацией носителей заряда в ее объеме на уровне 10^{18} см⁻³ приводит к формированию слоя аккумуляции заряда, перераспределению концентрации носителей заряда в объеме ИТО и, как следствие, к изменению удельного сопротивления, показателей преломления и поглощения ИТО. Это позволяет использовать тонкие пленки ИТО с концентрацией носителей на уровне 10^{18} см⁻³ в качестве канального слоя тонкопленочного транзистора и плазмонного слоя адсорбционного электрооптического модулятора.

4. Обработка пленок ИТО в составе газочувствительных сенсоров УФ-излучением с длиной волны менее 400 нм приводит к обратимому повышению их чувствительности к парам углеводородов не менее чем на 10%, что связано с повышением концентрации кислородных вакансий за счет разрушения в приповерхностном слое химических связей In – O.

5. Разработанная и внедренная в производство технология формирования оптически прозрачного слоя растекания тока на основе In+Sn/ИТО методом

магнетронного распыления к слою p-GaN светодиодной гетероструктуры InGaN/AlGaIn/GaN обеспечивает коэффициент пропускания слоя растекания тока 80% на длине волны 450 нм и удельное контактное сопротивление $9 \cdot 10^{-4}$ Ом·см², а также способствует повышению КПД светодиода более чем в 2 раза.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы подтверждаются их корреляцией с данными других известных работ в области ИТО; 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 научных журналах; внедрением результатов исследований в промышленное производство.

Использование результатов исследований

Полученные результаты имеют важное хозяйственное значение, заключающееся в создании научных основ синтеза электропроводящих оптически прозрачных тонких пленок ИТО методом магнетронного распыления с контролируемыми и управляемыми электрическими и оптическими характеристиками.

Результаты диссертационной работы использованы рядом промышленных предприятий и научных организаций:

1) НИ Томским государственным университетом и Институтом общей и неорганической химии имени Н.С. Курнакова РАН (ИОНХ РАН) при сборке сенсibilизированных красителями солнечных элементов с конфигурацией стекло / ИТО / мезопористый TiO₂ / безметалльный краситель / противоэлектрод;

2) АО «НИИПП» в технологии формирования слоя растекания тока для светодиодного кристалла синего цвета свечения на основе гетероэпитаксиальной структуры InGaIn/AlGaIn/GaN;

3) Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (ИПУ РАН) при защите смотровых окон кожухов видеокамер малых летательных аппаратов от запотевания и обледенения;

4) Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН (ИОА СО РАН) при разработке перспективного для систем связи и лидарных систем обнаружения объектов прототипа адсорбционного электрооптического модулятора на основе волновода Si₃N₄, нагруженного ИТО;

5) ООО «ДЕФАН» при разработке прототипа быстродействующего и сверхчувствительного кремниевое фотодетектора с широким динамическим диапазоном;

6) ООО «Лаборатория 23» при формировании адгезионного слоя перед осаждением многослойных низкоэмиссионных тонкопленочных покрытий;

7) ООО НПК «ТЕСАРТ» и Лабораторией интегральной оптики и радиофотоники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники при разработке частотного фильтра на основе пленок ИТО для подавления электромагнитных помех в СВЧ-диапазоне;

8) Научно-исследовательским институтом светодиодных технологий Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники при

формировании оптически прозрачных проводящих контактов для изготовления экспериментальных образцов органических светоизлучающих диодов;

9) Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Институт химии растворов им. Г.А. Крестова РАН при формировании прозрачных электродов на листовом стекле для проведения научных исследований процессов электрополимеризации порфиринов;

10) ООО «Тинт-ит» при формировании прозрачных электродов для производства электрохромных панелей.

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

1) научный проект «Теоретические исследования и экспериментальная разработка оптической приставки для анализа параметров компонентов высокоскоростных волоконно-оптических систем передачи аналогового и цифрового сигналов», выполняемой при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках соглашения № FEWM-2024-0004 от 17.01.2024;

2) научный проект № 21-72-00124 «Физические основы возбуждения и распространения поверхностных электромагнитных волн в структурах диэлектрик/пленка ИТО для формирования оптических сенсоров», выполняемый при финансовой поддержке РФФИ;

3) научный проект «Теоретические и экспериментальные исследования сверхширокополосных оптоэлектронных устройств волоконно-оптических систем передачи информации и радиофотоники на основе фотонных интегральных схем собственной разработки» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках соглашения № 075-03-2020-237/1 от 05.03.2020г. (внутренний номер проекта FEWM-2020-0040);

4) 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;

5) 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.;

6) 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;

7) 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;

8) проект фундаментальных исследований РАН № 0293-2019-0006 «Исследование и разработка базовых принципов построения элементов

радиофотонного тракта с частотами до 1 ТГц и построения систем на их основе», выполняемый при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ;

9) 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;

10) 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.

Апробация результатов работы

Результаты позволили подготовить заявки, победившие в 9 конкурсах: 2 гранта РФФИ; 1 грант РНФ; 5 государственных заданий; ФЦП ИР.

Основные результаты исследований докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1) XI международной конференции «Пленки и покрытия – 2013» (Санкт-Петербург, 2013);

2) всероссийских научных конференциях с международным участием «Полифункциональные химические материалы и технологии» (г. Томск, 2013, 2019);

3) международных конференциях специалистов по микронанотехнологиям и электронным приборам «EDM» (г. Новосибирск, 2014, 2019);

4) 5-й международной научно-практической конференции «Технология микро- и нанoeлектроники в наносистемной технике» (г. Москва, 2016);

5) International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2019 (Томск, 2019);

6) 14-й международной конференции «Газоразрядные плазмы и их применение» (Томск, 2019);

7) 13-й Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом» (Минск, 2019);

8) XV Международной научной конференции «Прикладная оптика – 2022» (Санкт-Петербург, 2023);

9) 9th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (Томск, 2024);

10) Всероссийская научная конференция с международным участием «Невская фотоника – 2025» (Санкт-Петербург, 2025).

Личный вклад автора

Автору принадлежит ключевая роль в получении основных результатов исследований. Автором осуществлялись: постановка цели и задач научного исследования, обоснование актуальности исследований, планирование, организация и проведение большинства экспериментов по разработке технологических основ синтеза тонких низкоомных оптически прозрачных пленок ИТО и исследование электрических и оптических свойств тонких плёнок ИТО, а также формулирование научных выводов по каждой главе диссертации и обобщенных выводов по диссертационной работе. Все результаты, составляющие научную новизну и выносимые на защиту, получены автором лично.

Участие в проведении ряда экспериментов, расчетов и обсуждении результатов принимали д-р техн. наук, профессор С.В. Смирнов и д-р техн. наук, доцент Ю.В. Сахаров, канд. техн. наук С.В. Ишуткин. Новизна полученных результатов и выносимые на защиту научные положения формулировались в обсуждении с научным

консультантом д-ром техн. наук, профессором П.Е. Трояном. Результаты по отдельным направлениям получены совместно с соавторами научных публикаций, входящими в научную группу автора.

Публикации по теме диссертации

По результатам исследований опубликовано 70 печатных работ, из которых 17 в рецензируемых журналах из перечня ВАК по специальности 1.3.5 – «Физическая электроника» (технические науки) и 12 работ в изданиях, индексируемых в базах научных публикаций Scopus и Web of Science, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций. Получены 6 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ и 6 патентов на изобретения и полезные модели.

Структура и объем диссертации

В состав диссертации входят введение, 5 разделов, заключение, список источников из 288 наименований и 2 приложения. Объем диссертации с приложениями составляет 251 с., в т.ч. 109 рисунков и 20 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования; определены проблема и цель исследования, объект и предмет исследования; сформулированы задачи и методы исследования; раскрыты научная новизна, теоретическая и практическая значимость исследования; изложены основные положения, выносимые на защиту; описаны апробация и внедрение результатов исследования.

Первая глава «Современное состояние исследований пленок ИТО (обзорная)» является обзорной и представляет собой критический анализ исследований по тематике диссертации. В ней рассмотрена современная научная литература, посвященная описанию структуры плёнок ИТО, а также их оптических и электрических свойств. Показано, что оксид индия является широкозонным полупроводником n-типа проводимости. Наличие в оксиде индия свободных электронов, концентрация которых находится в диапазоне 10^{19} – 10^{20} см⁻³, связано с образованием кислородных вакансий. Формула оксида индия имеет вид: $\text{In}_2\text{O}_{3-x}(\text{V})_x$, где V — дважды заряженная вакансия кислорода. Легирование оксида индия атомами четырехвалентного олова приводит к формированию ИТО в виде: $\text{In}_{2-y}\text{Sn}_y\text{O}_{3-2y-x}(\text{V})_x$ и к увеличению концентрации носителей заряда до 10^{21} см⁻³.

Оптические свойства пленок ИТО связаны с их электрическими свойствами и определяются зонной структурой и имеющимися дефектами. В УФ-диапазоне пленки ИТО демонстрируют высокое поглощение излучения (рисунок 1). В видимой области спектра пропускание пленок ИТО может достигать до 80 %. В ИК области резко увеличивается отражение. Также поглощение излучения пленкой ИТО наблюдается при длине волны около 1500 нм. Такое увеличение поглощения связывают с плазмонной длиной волны, когда частота света совпадает с частотой

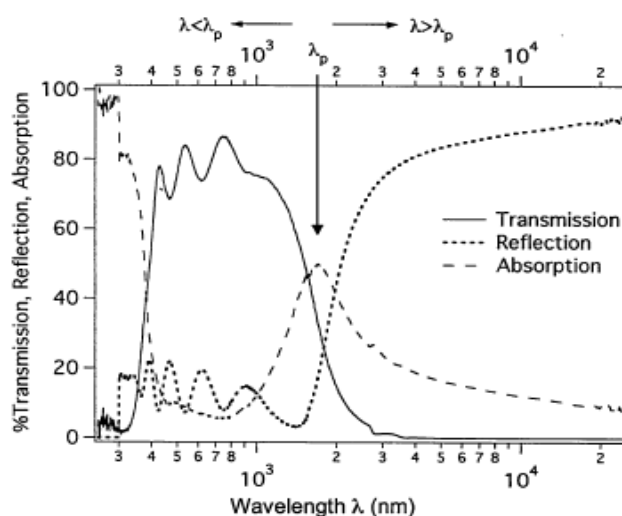


Рисунок 1 – Типичные спектры пропускания, отражения и поглощения плёнки ИТО

осцилляций электронов в ИТО. Положение зон поглощения, пропускания и отражения зависит от способа осаждения ИТО. В связи с этим наиболее перспективным методом синтеза пленок ИТО является магнетронное распыление. При варьировании различных технологических параметров (давление рабочего газа, состав рабочей атмосферы, ток газового разряда и т.д.) данный метод позволяет управлять свойствами получаемых покрытий в довольно широком диапазоне. По этой причине в работе более детальное рассмотрение отводится синтезу пленок ИТО методом магнетронного распыления.

Рассмотрение научных работ, связанных с исследованием воздействия на пленки ИТО УФ-излучения, возбуждением плазмонного резонанса и изменением электрических и оптических свойств пленок ИТО при воздействии электрического поля показали, что изучение таких процессов может способствовать созданию устройств оптоэлектроники с принципиально новыми возможностями.

На основании проведенного анализа были сформулированы и обоснованы задачи исследования.

Вторая глава «Технология синтеза тонких пленок ИТО. Физические, оптические и электрические свойства» посвящена описанию использованного в работе технологического, измерительного и аналитического оборудования, а также результатам разработки технологии синтеза низкоомных тонких плёнок ИТО и исследованию их физических, оптических, электрических свойств.

Для проведения исследований тонкие пленки ИТО синтезировались на установке вакуумного осаждения тонких пленок EPOS-PVD методом реактивного магнетронного распыления мишени $\text{In}(90\%)/\text{Sn}(10\%)$ в атмосфере рабочей смеси газов $\text{Ar} + \text{O}_2$. Важнейшим фактором при синтезе тонких пленок ИТО с минимальным удельным сопротивлением и максимальным коэффициентом пропускания этим методом является подбор соотношения аргона и кислорода, подаваемых в зону распыления мишени. Экспериментальный подбор оптимального соотношения парциальных давлений аргона и кислорода для синтеза тонких низкоомных пленок ИТО осуществлялся путем постепенного снижения парциального давления O_2 в рабочей смеси газов $\text{Ar} + \text{O}_2$ в вакуумной камере в диапазоне от $1,13 \cdot 10^{-3}$ до $3,6 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. Парциальное давление Ar во время осаждения не менялось и составляло $3,7 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст., обеспечивая стабильное горение магнетронного разряда. Температура подложки во время осаждения составляла 350°C . После осаждения пленок ИТО прекращалась подача рабочих газов и без развакуумирования рабочей камеры образцы подвергались высокотемпературному отжигу в вакууме при температуре 450°C в течение 20 мин.

В результате корректировки технологических режимов было установлено, что наименьшим удельным поверхностным сопротивлением и высокой оптической прозрачностью обладают пленки, осажденные при распылении мишени $\text{In}(90\%)/\text{Sn}(10\%)$ в смеси газов Ar (при парциальном давлении $3,7 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.) / O_2 (при парциальном давлении $5,2 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст.) и температуре подложки 350°C с последующим отжигом в вакууме при температуре 450°C в течение 20 мин.

Измерение толщины полученных образцов пленок ИТО показало, что при увеличении парциального давления напускаемого кислорода более $5,2 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. толщина осаждаемых пленок резко снизилась в среднем в 5 раз. Исследование режима работы магнетронной системы распыления показало, что при увеличении парциального давления напускаемого кислорода больше $5,2 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. происходит окисление поверхности распыляемой мишени.

Исследование состава плазмы газового разряда во время распыления мишени $\text{In}(90\%)/\text{Sn}(10\%)$ в атмосфере Ar/O_2 с разным парциальным давлением кислорода

осуществлялось путем исследования эмиссионного спектра плазмы газового разряда оптическим спектрометром AvaSpec-ULS2048, а также путем исследования ионного состава плазмы модифицированным квадрупольным масс-спектрометром RGA-300.

Эмиссионные спектры плазмы газового разряда показали, что практически все наблюдаемые в регистрируемом спектрометром диапазоне линии с высокой интенсивностью принадлежат ионам аргона и кислорода. Присутствующие эмиссионные линии разнозарядных ионов In и Sn обладают значительно меньшей интенсивностью и соответствуют по большей части неустойчивым валентностям. Было отмечено, что выбор определенных эмиссионных линий Ar и O₂, и соотношение их интенсивностей с эмиссионной линией In³⁺ на длине волны 450,85 нм может позволить контролировать корректный состав рабочей газовой смеси при синтезе низкоомных пленок ИТО. Более точный контроль состава газовой атмосферы можно реализовать ориентируясь на интенсивность основных спектральных линий ионов In³⁺ и Sn⁴⁺, но они находятся в ИК-области за пределами рабочего диапазона AvaSpec-ULS2048.

Информативные исследования плазмы газового разряда удалось выполнить с использованием модифицированного квадрупольного масс-спектрометра RGA-300. На рисунке 2 приведены результаты измерения ионного состава плазмы газового разряда при различных парциальных давлениях напускаемого кислорода.

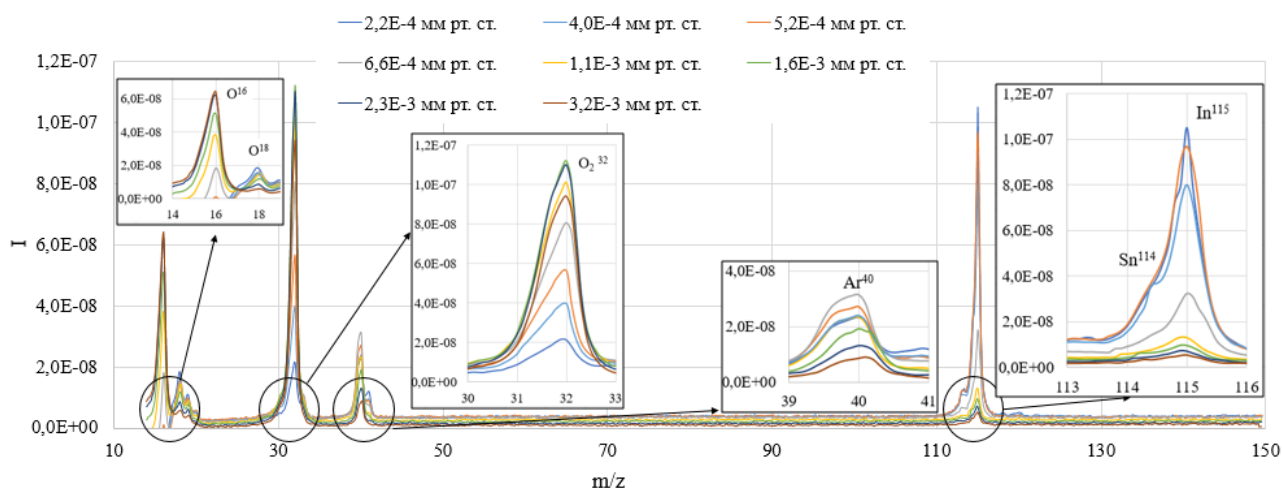


Рисунок 2 – Ионный состав плазмы газового разряда при различных парциальных давлениях напускаемого кислорода (парциальное давление аргона составляет $3,7 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.)

Исследование ионного состава плазмы газового разряда при различных парциальных давлениях напускаемого кислорода показало, что при парциальном давлении напускаемого в рабочую камеру кислорода менее $5,2 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. в составе плазмы газового разряда основную часть составляют изотопы металлов In¹¹⁵ и Sn¹¹⁴. При этом атомарный кислород O¹⁶ отсутствует, а содержание молекулярного кислорода O³² очень мало. Увеличение парциального давления напускаемого кислорода более $5,2 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. ведет к резкому снижению концентрации изотопов металлов, возрастанию молекулярного кислорода (рисунок 2, вторая вставка) и появлению атомарного кислорода (рисунок 2, первая вставка).

Помимо удельного сопротивления изменение парциального давления напускаемого кислорода оказывает значительное влияние на структуру пленок ИТО. На рисунке 3 приведены РЭМ-изображения образцов пленок, осажденных на полированные кремниевые подложки при варьируемых парциальных давлениях кислорода от 0 до $3,2 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. без проведения высокотемпературного отжига и с

отжигом при температуре 450 °С в течение 20 мин. Для уравнивания толщин исследуемых образцов пленок ИТО, осаждаемых при парциальном давлении кислорода больше $5,2 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст., когда происходит окисление поверхности распыляемой мишени, время их осаждения было увеличено с 10 до 40 мин.

Анализ приведенных на рисунке 3 РЭМ-изображений показывает, что количество кислорода в процессе синтеза пленок ИТО оказывает значительное влияние на их рост и морфологию поверхности. Магнетронное распыление металлической мишени In/Sn в бескислородной среде приводит к конденсации на подложке больших каплеобразных структур (рисунок 3а), что указывает на значительное количество достигаемой подложки жидкой фазы в соответствии с механизмом роста «пар – жидкость – твердое тело». Во время синтеза при высокой температуре подложки атомы In и Sn достигают ее поверхности, где они могут образовывать одинарную связь в каплях сплава In/Sn. Радиус таких капель достигает 200 нм при толщине сплошного формируемого между ними слоя около 30 нм. При проведении высокотемпературного отжига из капель сплава In/Sn происходит формирование нанопроволок ИТО (рисунок 2б). Тщательное наблюдение показывает появление крошечных шариков на кончике каждой нанопроволоки, что еще раз подтверждает механизм роста «пар – жидкость – твердое тело».

При небольшом содержании в рабочей камере кислорода с парциальным давлением $2,2 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. (рисунок 2в) ИТО формируется в виде наностержней. По всей видимости это обусловлено тем, что In_2O_3 и SnO_2 могут растворяться в каплях сплава In/Sn и образовывать тройной сплав с одинарной связью In/Sn/O. В атмосфере с дефицитом кислорода при высокой температуре нанокристаллы $\text{In}_2\text{O}_3\text{:Sn}$ будут расти в определенном направлении из капель сплава In/Sn/O. Стоит отметить, что в наблюдаемом случае длина сформированных наностержней составляет до 2 мкм при толщине сплошного нижнего слоя ИТО около 70 нм. Последующий высокотемпературный отжиг сформированных наностержней (рисунок 2г) приводит к их оплавлению и уплотнению, в результате чего формируется пористый слой пленки ИТО. Исчезновение сферических частиц в пленке по сравнению с рисунком 2б указывает на уменьшение количества жидкой фазы, присутствующей во время роста.

При парциальном давлении кислорода в рабочей камере на уровне $4,0 \cdot 10^{-4}$ – $5,2 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. (рисунки 2д-з) на подложке формируется сплошная плотная пленка ИТО, сохраняющая свою структуру и после проведения высокотемпературного отжига. Следует отметить, что в последующем измеренное удельное электрическое сопротивление осажденных при этом парциальном давлении кислорода пленок ИТО оказалось наименьшим среди всех режимов. При парциальном давлении кислорода $6,6 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. и более осаждаемые пленки имеют слоистую структуру (рисунок 2и-т), а их удельное электрическое сопротивление увеличивается.

Таким образом, проведенные исследования подтверждают определенное ранее оптимальное парциальное давление напускаемого в рабочую камеру кислорода в диапазоне $4,0 \cdot 10^{-4}$ – $5,2 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. для синтеза тонких низкоомных плёнок ИТО с высокой прозрачностью методом реактивного магнетронного распыления.

В таблице 1 приведены результаты исследования электронно-кинетических характеристик носителей заряда методом Холла в низкоомных пленках ИТО, осажденных при парциальном значении напускаемого кислорода $5,2 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. до и после проведения высокотемпературного отжига. Анализ полученных результатов показал, что после проведения высокотемпературного отжига пленок ИТО снижение

удельного поверхностного сопротивления обусловлено одновременным увеличением и концентрации, и подвижности носителей заряда.

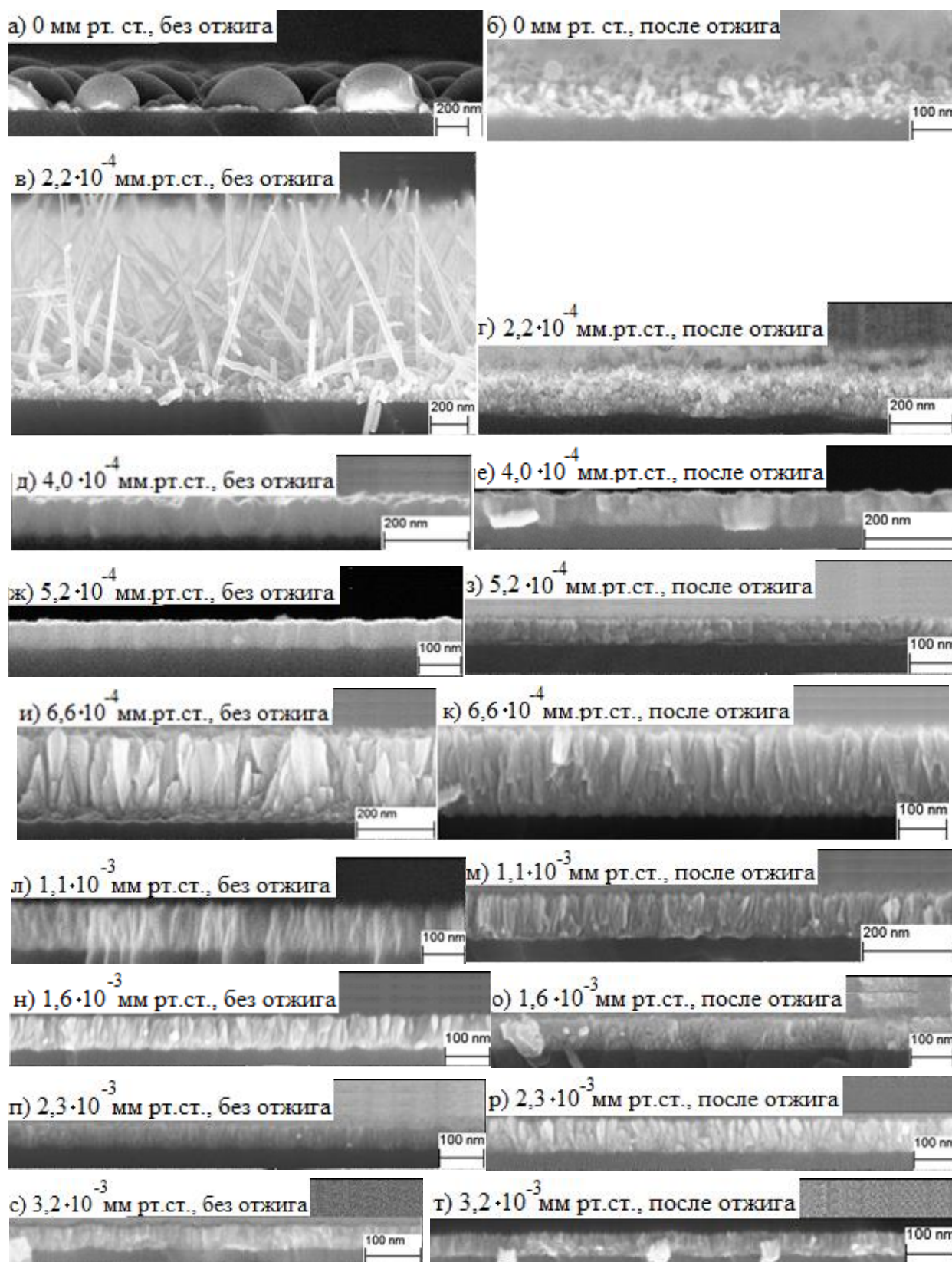


Рисунок 3 – РЭМ-изображения торцевых сколов экспериментальных образцов тонких пленок ИТО, осажденных при варьируемом парциальном давлении напускаемого кислорода от 0 до $3,2 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. без проведения высокотемпературного отжига и после отжига

Таблица 1 – Оцененные методом Холла электронно-кинетические характеристики носителей заряда в тонких низкоомных пленках ИТО

Режим	$\rho_v, \text{Ом}\cdot\text{см}$	$n, \text{см}^{-3}$	$\mu, \text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$
До отжига	$1,15\cdot 10^{-3}$	$6,11\cdot 10^{20}$	8,9
После отжига	$4,76\cdot 10^{-4}$	$7,8\cdot 10^{20}$	32,1

СЗМ- и РЭМ-изображения рельефа исследуемых пленок ИТО показали, что после проведения высокотемпературного отжига поверхность пленок имеет меньшую шероховатость. Средняя шероховатость плёнок ИТО, осажденных на полированном кремнии без отжига, составляет $\Delta\bar{h}=17,57$ нм, средний размер зерна – 40 нм, в то время как средняя шероховатость плёнок ИТО после проведения высокотемпературного отжига в вакууме была $\Delta\bar{h}=14,28$ нм, а средний размер зерен увеличивается до 60 нм.

Анализ результатов изменения фазового состава пленок ИТО показал, что пленки, осажденные на подложку без нагрева, обладают только аморфной фазой. При осаждении ИТО на нагретую до 350 °С подложку частично образуется кристаллическая структура (рисунок 4а) с ориентацией плоскости отражения (211) и сравнительно менее выраженная кристаллическая структура с ориентацией плоскости отражения (440). Последующий высокотемпературный отжиг пленок ИТО в вакууме при 450 °С приводит к сохранению имеющихся кристаллических плоскостей, что, вероятно, указывает на уже сформированную кристаллическую структуру оксида индия (рисунок 4б). Помимо этого, после проведения высокотемпературного отжига на рентгенограмме появляются дополнительные пики, соответствующие плоскостям отражения (400) и (622), что может указывать на активацию примеси олова. Общая рентгенограмма, полученная после дополнительного отжига синтезированных пленок ИТО в вакууме при 450 °С, согласуется с референсной рентгенограммой пленок ИТО из базы данных дифрактометра (красные маркеры на рисунке 4б). Таким образом, увеличение подвижности носителей заряда пленок ИТО после проведения высокотемпературного отжига связано с изменением их фазового состава.

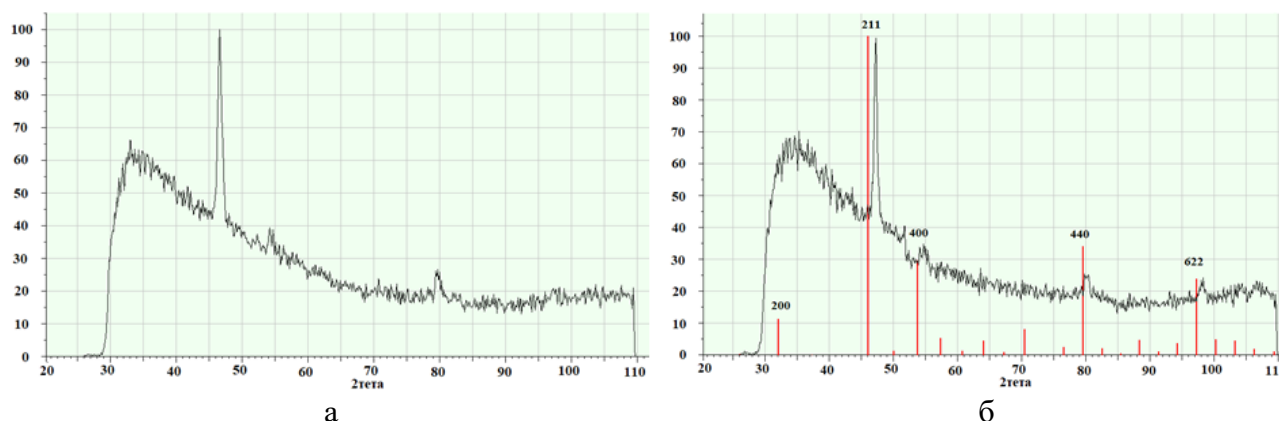


Рисунок 4 – Рентгенограмма плёнок ИТО, осажденных на подложку при 350 °С до (а) и после (б) высокотемпературного отжига в вакууме при 450 °С в течение 20 мин. Красные маркеры показывают референсную рентгенограмму пленок ИТО из справочной базы данных

Особый интерес при исследовании пленок ИТО вызывает определение доминирующего механизма электропроводности из-за вклада в электропроводность нескольких составляющих: электропроводности, обусловленной наличием донорных кислородных вакансий и примесной электропроводности, обусловленной наличием атомов четырехвалентного олова. Исследование температурной зависимости

электропроводности образцов, не подвергавшихся отжигу после напыления, указало на полупроводниковый тип проводимости, что наиболее вероятно связано с процессом температурной ионизации примесных атомов Sn. У образцов пленок ИТО после высокотемпературного отжига тип проводимости меняется на металлический. Это также указывает на электрическую активацию примесных атомов олова в пленках ИТО в результате проведения высокотемпературного отжига.

Положение уровня Ферми в низкоомных плёнках ИТО, подверженных высокотемпературному отжигу, было оценено двумя способами: через экспериментально измеренный коэффициент термоЭДС контакта металл/пленка ИТО, что показало значение разницы энергий $E_C - E_F = -0,09$ эВ, и через расчет эффективной плотности энергетических состояний в зоне проводимости с учетом эффективной массы электронов в ИТО, что дало значение $E_C - E_F = -0,125$ эВ. Отличие полученных значений обусловлено сильным влиянием состояния поверхности ИТО на коэффициент термоЭДС. При измерении коэффициента термоЭДС на поверхности образцов ИТО неизбежно будут присутствовать адсорбированные газы, что приводит к заполнению кислородных вакансий в приповерхностном слое и, следовательно, к уменьшению концентрации свободных электронов в этой области, в результате чего оцененное через коэффициент термоЭДС значение уровня Ферми занижается.

Оба полученных значения положения уровня Ферми в низкоомных пленках ИТО, а также превышение измеренного значения концентрации носителей заряда оцененной величины плотности состояний в зоне проводимости ($N_C = 6,32 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) указывают на вырождение ИТО.

На рисунке 5а приведены измеренные с вычетом вклада подложки оптические спектры пропускания и отражения экспериментальных образцов низкоомных плёнок ИТО до и после проведения отжига. Анализ спектров показал, что проведение высокотемпературного отжига пленок ИТО приводит к уменьшению оптического поглощения. Резонансная длина волны при этом смещается в коротковолновую область. Максимальное пропускание наблюдается в диапазоне длин волн 0,35–1 мкм.

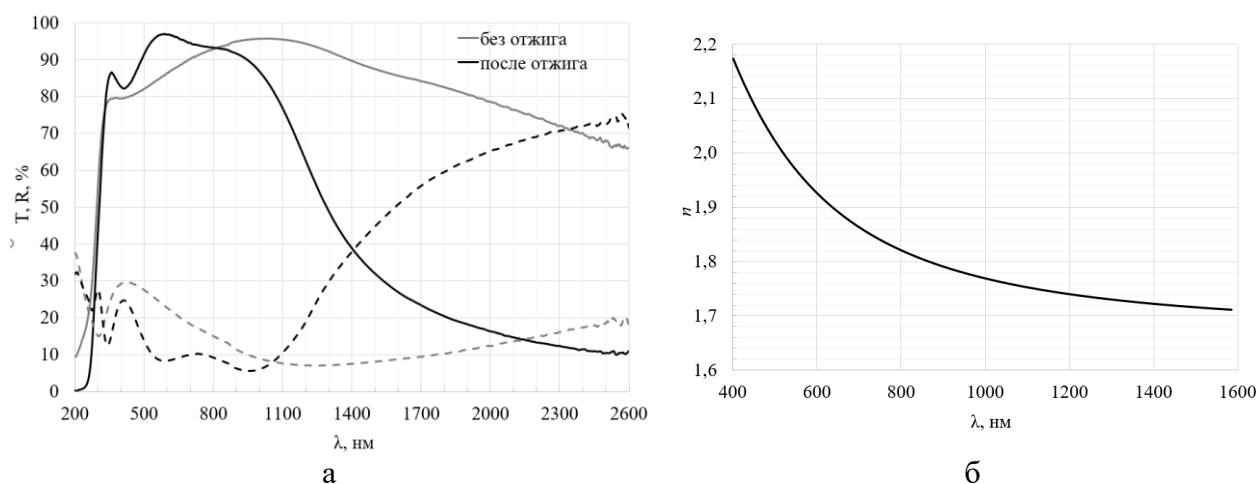


Рисунок 5 – Спектры пропускания (сплошные линии) и отражения (штриховые линии) низкоомных пленок ИТО до (серый цвет) и после (черный цвет) проведения высокотемпературного отжига (а) и их дисперсия показателя преломления (б)

Измеренные спектры пропускания и отражения в УФ-диапазоне длин волн от 200 до 500 нм позволили оценить ширину оптической щели по методу Тауца и показали её значения 5,12 эВ для низкоомных пленок ИТО до высокотемпературного отжига и 5,2 эВ для низкоомных пленок ИТО после проведения высокотемпературного отжига.

На рисунке 5б приведена экспериментальная дисперсия показателя преломления низкоомных пленок ИТО, подверженных высокотемпературному отжигу. Показатель преломления пленок ИТО, осажденных по разработанной технологии в видимой области спектра, лежит в диапазоне от 1,79 до 2,17.

Таким образом, синтез оптически прозрачных тонких пленок ИТО с высокой электропроводностью методом реактивного магнетронного распыления мишени In (90%)/Sn (10%) должен осуществляться при токе разряда 0,3 А в атмосфере смеси газов Ar/O₂ при парциальных давлениях аргона $3,7 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. и кислорода $5,2 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст., температуре подложки в процессе осаждения выше 300 °С с последующим отжигом в вакууме при температуре 450 °С в течение 20 мин. Последующий после осаждения высокотемпературный отжиг пленок ИТО в бескислородной среде приводит к формированию кислородных вакансий, активации примесных атомов олова, а также к формированию поликристаллической структуры.

Третья глава посвящена описанию результатов исследования взаимосвязи электрических и оптических свойств пленок ИТО при изменении концентрации носителей заряда в их объеме. Для оценки влияния изменения концентрации электронов проводимости тонких пленок ИТО на их оптические характеристики была подготовлена серия образцов, осажденных при разном парциальном давлении кислорода, в диапазоне от $2,2 \cdot 10^{-4}$ до $3,2 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. аналогично образцам, исследованным во второй главе. Парциальное давление напускаемого аргона в процессе осаждения всех образцов сохранялось постоянным и составляло $3,7 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. Температура подложек в процессе осаждения – 350 °С. После осаждения ИТО прекращалась подача рабочих газов и для части образцов осуществлялся отжиг в вакууме при температуре 450 °С в течение 20 мин. Удельное объемное сопротивление подготовленных таким образом образцов пленок ИТО рассчитывалось из измеренного четырехзондовым методом Ван-дер-Пау поверхностного сопротивления ИТО с учетом их толщины приведено на рисунке 6.

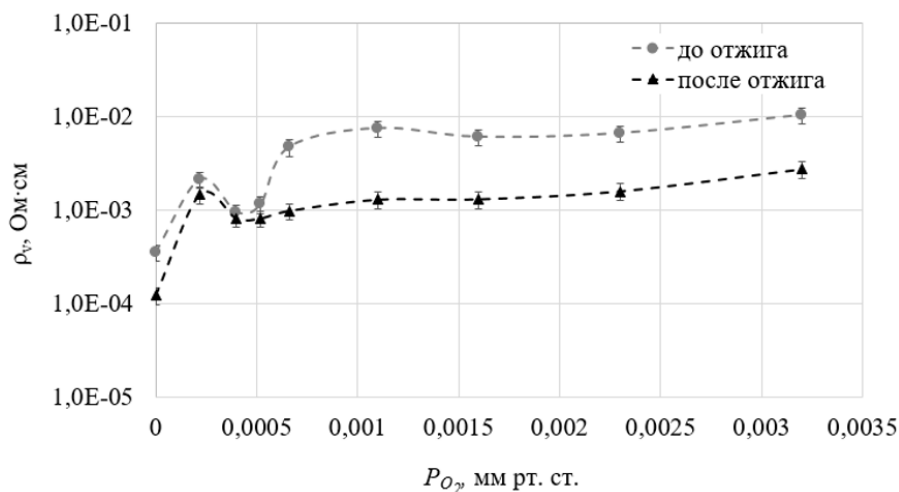


Рисунок 6 – Изменение удельного объемного сопротивления пленок ИТО, осажденных при разном парциальном давлении напускаемого кислорода

Изменение удельного объемного сопротивления пленок ИТО, осажденных при разном парциальном давлении напускаемого в зону распыления мишени кислорода, связано непосредственно с изменением концентрации носителей заряда. Изменение концентрации носителей заряда ведет к изменению оптических свойства плёнок ИТО, смещая резонансную длину волны в точках, где $T = R$ (см. рисунок 5а). Используя эту взаимосвязь через определение резонансной длины волны была оценена концентрация

электронов проводимости в исследуемых образцах пленок ИТО с разной степенью окисления и рассчитана их подвижность (рисунок 7).

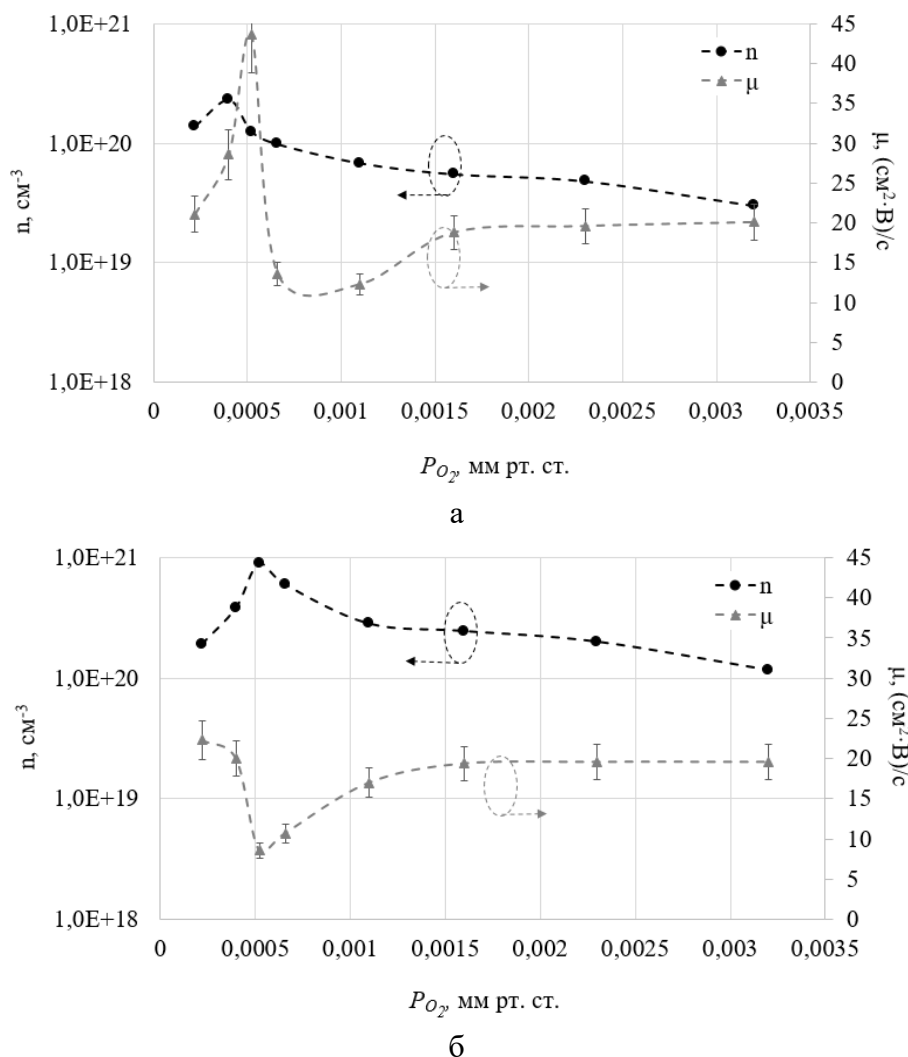


Рисунок 7 – Изменение концентрации и подвижности носителей заряда в пленках ИТО, осажденных при разном парциальном давлении напускаемого кислорода до проведения высокотемпературного отжига (а) и после отжига в вакууме (б)

Исследование дисперсии показателей преломления и поглощения исследуемых образцов тонких пленок ИТО с разной степенью окисления до и после отжига в вакууме также показали взаимосвязь с концентрацией носителей заряда. Это позволяет при воздействии на пленку ИТО нанометровой толщины внешнего электрического поля управлять ее электропроводностью и оптическим поглощением, что делает возможным использование тонких пленок ИТО в приборах тонкопленочной электроники.

Первым таким прибором, рассмотренным в главе, является тонкопленочный транзистор. Проведенное моделирование его структуры показало, что полное перекрытие канала тонкопленочного транзистора происходит при толщине канального слоя ИТО 30 нм. Для полного перекрытия канала такой толщины при приложенном напряжении меньше пробивного напряжения подзатворного диэлектрика требуется использовать в качестве канального слоя пленку ИТО с концентрацией носителей заряда на уровне $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Для снижения концентрации носителей в ИТО до требуемого уровня осажденные высокоомные пленки ИТО дополнительно подвергались анодированию в растворе лимонной кислоты с молярной концентрацией

0,001М. В результате анодирования их концентрация снизилась с $3,01 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ до практически $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

Изготовленные тонкопленочные транзисторы с анодированными пленками ИТО показали свою работоспособность, а их передаточные характеристики соответствуют характеристикам полевых транзисторов. Помимо изменения электрического сопротивления слоя ИТО при воздействии внешнего электрического поля, наличие слоя аккумуляции заряда в приповерхностном слое ИТО приводит к изменению показателей преломления и поглощения и позволяет реализовать на базе ИТО адсорбционный электрооптический модулятор. Кроме этого, в главе показано, что низкоомные пленки ИТО, осажденные на *p*-InGaAs слой InP/InGaAs-гетероструктуры после отжига при температуре 300 °С в течение 10 минут формируют омический контакт. Это дает возможность изготовления электрооптических модуляторов на основе InP/InGaAs-гетероструктуры с использованием технологии самосовмещенного с волноводом омического контакта.

Четвертая глава посвящена исследованию фотоэлектрического отклика тонких пленок ИТО. Для выявления ключевых факторов, определяющих механизмы фотоиндуцированных процессов, было исследовано воздействие УФ-излучения на пленки ИТО с разным удельным сопротивлением синтезированных при парциальном давлении кислорода $5,2 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. но при разной температуре подложек и с разными режимами отжига. Методика проводимых исследований заключалась в контроле изменения электрического сопротивления и возникающей на контактных площадках исследуемых образцов разницы потенциалов при их облучении УФ-излучением (основная полоса облучения находилась на длине волны 308 нм) в течение 10 мин, а также при последующей релаксации пленок в течение этого же времени без воздействия УФ-излучения. Результаты исследований приведены на рисунке 8а.

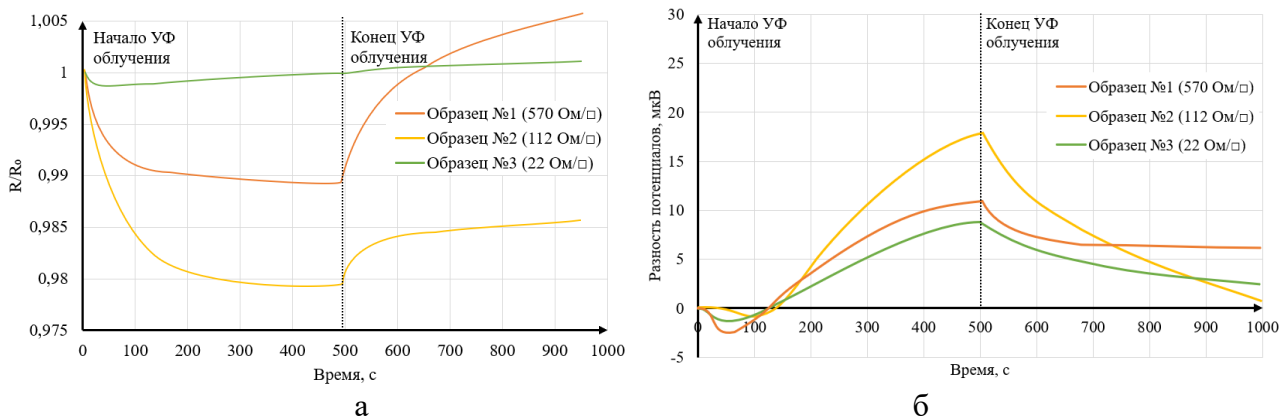


Рисунок 8 – Графики изменения сопротивления образцов пленок ИТО (а) и изменения возникающей на электродах разности потенциалов (б) при УФ-экспозиции

После того как воздействие УФ-излучения на образцы пленок ИТО прекращается, их сопротивление возвращается к первоначальному значению. Проведенные исследования показали, что экспоненциальное снижение сопротивления пленок ИТО при облучении УФ-излучением и его восстановление после облучения, обусловлено разрушением химической связи In – O, освобождением атома кислорода и его миграцией к поверхности пленки, где происходит десорбция, что подтверждается измеренными ИК фурье-спектрами отражения образцов. При этом резкое снижение сопротивления образцов в первые 30 секунд облучения указывает на прохождение процессов в приповерхностном слое пленок до глубины поглощения УФ-излучения.

После выключения УФ-излучения процесс десорбции кислорода прекращается, а количество хемосорбированных атомов кислорода увеличивается. Наибольшую чувствительность к воздействию УФ-излучения проявляют плёнки ИТО с изначально низкой концентрацией носителей.

Изменение концентрации электронов проводимости в пленках ИТО при облучении УФ-излучением, а также их возбуждение и дрейф приводят к появлению разности потенциалов на электродах исследуемых образцов (рисунок 8б).

Полученные результаты показали, что у всех образцов возникающая разность потенциалов на контактных площадках со временем облучения УФ-излучением увеличивается. Причем в начале облучения наблюдается рост разности потенциалов обратной полярности. Смена знака возникающей разности потенциалов на контактах образцов указывает на наличие двух механизмов возникновения ЭДС.

Таким образом, можно выделить следующие основные процессы, происходящие в пленках ИТО при воздействии УФ-излучения. Во-первых, происходит генерация носителей заряда за счет десорбции адсорбированных атомов с поверхности ИТО приводящей к образованию кислородных вакансий. Кроме этого, генерация носителей заряда осуществляется за счет температурной активации примесных атомов олова. Во-вторых, происходит разделение сгенерированных носителей заряда за счет градиента температуры и неравномерности освещенности ИТО в середине образцов и на участках, закрытых алюминиевыми контактными площадками.

Проведенные исследования фотоэлектрического отклика пленок ИТО при воздействии УФ-излучения показывают возможность их использования в качестве чувствительного слоя детектора УФ-излучения. Увеличение концентрации носителей заряда в пленках ИТО при их облучении УФ-излучением имеет важное практическое применение для повышения чувствительности различных типов сенсоров анализа веществ, чувствительным слоем в которых является ИТО. Примером этого стали проведенные исследования по изменению чувствительности тонких пленок ИТО к адсорбированию на их поверхности углеводородов различных концентраций при облучении УФ-излучением.

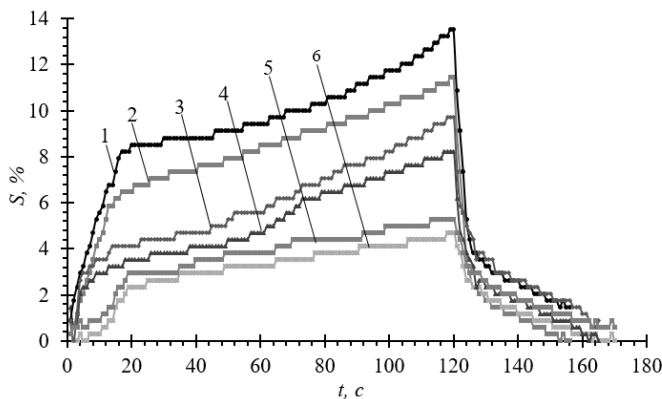


Рисунок 9 – Временная зависимость чувствительности образцов ИТО, подверженных предварительному отжигу в вакууме при температуре $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ при адсорбции паров испаряющихся веществ:

- 1, 3, 5 – газовая среда ацетона, нефраса и изопропила соответственно под УФ-излучением;
- 2, 4, 6 – газовая среда ацетона, нефраса и изопропила без воздействия УФ-излучения

Подготовленные газовые сенсоры на основе пленок ИТО помещались в эксикатор с гидрофильным сорбентом над чашкой Петри с испаряемыми веществами: ацетоном $\text{CH}_3\text{-C(O)-CH}_3$, изопропиловым спиртом $\text{CH}_3\text{-CH(OH)-CH}_3$ и нефтяным растворителем C_8H_{18} . Воздух из эксикатора предварительно был вытеснен. Эксикатор с загруженными в него газовыми сенсорами на основе пленок ИТО и каждым испаряемым веществом подвергался нагреву до температуры $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. В процессе нагрева производился контроль сопротивления сенсоров. На рисунке 9 приведены сравнительные

результаты исследования изменения чувствительности сенсоров на основе пленок ИТО, подверженных и не подверженных УФ-облучению. Результаты исследования показали, что при облучении пленок ИТО УФ-излучением происходит увеличение их чувствительности к адсорбирующимся веществам относительно первоначального значения в среднем на 10%.

На основе исследований была составлена модель происходящих при облучении УФ-излучением фотоиндуцированных и релаксационных процессов в ИТО.

В пятой главе приведены результаты применения пленок ИТО в качестве функциональных материалов для решения ряда прикладных задач.

Для применения низкоомных пленок ИТО в качестве слоя растекания тока светоизлучающего диода путем моделирования было определено, что его оптимальная толщина составляет 130 нм, удельное поверхностное сопротивление 15 Ом/квadrat, сопротивление контакта ИТО / p-GaN должно лежать в диапазоне от 10^{-2} до 10^{-4} Ом·см². Кроме того, синтез слоя ИТО на поверхности p-GaN светодиодной гетероструктуры AlInGaN методом магнетронного распыления должен быть обеспечен без появления в гетероструктуре радиационных дефектов и, следовательно, без ее деградации.

Для выполнения указанных требований была разработана технология осаждения низкоомных пленок ИТО с требуемыми характеристиками и включающая в себя предварительное осаждение тонкой металлической плёнки In + Sn методом магнетронного распыления мишени In(90%)/Sn(10%) в бескислородной среде, с последующим осаждением основной плёнки ИТО в том же вакуумном цикле при добавлении кислорода. Такая комбинация позволила получить значения контактного сопротивления ИТО / p-GaN на уровне $8 \cdot 10^{-4}$ Ом·см² при высокой прозрачности ИТО.

Измерения характеристик изготовленных кристаллов светодиодов с контактами Ni/Au, Ni/Au/ITO и In+Sn/ITO показали, что все подготовленные образцы светодиодов обладают схожими значениями напряжений в диапазоне 3,04–3,1 В при прямом токе 120 мА. Однако мощность испускаемого оптического излучения кристаллов отличалась и была напрямую связана с прозрачностью контакта к p-GaN. Для указанных контактов мощность оптического излучения составила 41, 70 и 101 мВт соответственно (рисунок 10а). Внешний вид рабочего кристалла светодиода со слоем растекания тока In+Sn/ITO показан на рисунке 10б.

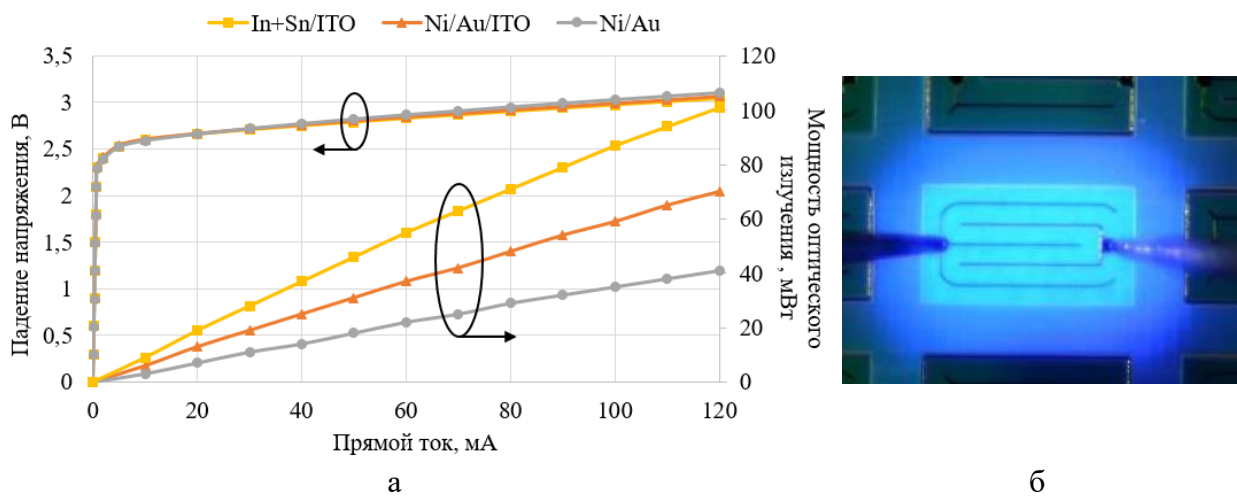


Рисунок 10 – Зависимость напряжения и мощности излучения от прямого тока для кристаллов светодиодов с различным контактом к p-GaN слою (а) и внешний вид рабочего кристалла со слоем растекания тока на пластине (б)

Таким образом, использование системы In+Sn/ITO в качестве контакта к p-GaN позволило увеличить КПД светодиода более чем в 2 раза относительно применения традиционного полупрозрачного контакта Ni/Au. По данному применению получен акт внедрения от АО «НИИПП» (г. Томск).

Проведенный анализ применимости пленок ITO с разной степенью окисления в качестве оптически прозрачных электропроводящих покрытий для химических исследований показал, что низкоомные пленки ITO толщиной 100 нм, осажденные в диапазоне парциальных давлений кислорода от $4 \cdot 10^{-4}$ до $5,2 \cdot 10^{-4}$ Па имеют удовлетворительную стойкость к электрохимическому воздействию химических сред и устойчивость к органическим и неорганическим растворителям. Это позволило их использовать при проведении исследований процессов электрополимеризации порфиринов на подготовленных ITO-стеклах, в качестве оптически прозрачных электродов электрохромных и фотовольтаических устройств. По указанным применениям получены акты использования результатов диссертационной работы от ОАО «Тинт-ит» (г. Новосибирск), Института химии растворов им. Г.А. Крестова РАН (г. Иваново), ФГАОУ ВО НИ ТГУ (г. Томск), ИОНХ РАН (г. Москва).

Проведенные исследования эффективности экранирования микроволнового излучения оптически прозрачными пленками ITO с разным удельным сопротивлением показали, что пленки ITO могут успешно использоваться в качестве оптически прозрачного экрана микроволнового излучения. Максимальное полученное затухание СВЧ-сигнала было наблюдалось при использовании ITO с удельным поверхностным сопротивлением $5 \text{ Ом}/\square$ и составило не менее 33 дБ в диапазоне частот 8–12 ГГц и не менее 27 дБ в диапазоне частот 24–32 ГГц. По указанному применению получены акты использования результатов диссертационной работы от ТУСУР (г. Томск) и ООО НПК «ТЕСАРТ» (г. Томск).

Резистивные пленки ITO с удельным поверхностным сопротивлением $100 \text{ Ом}/\square$ могут быть эффективно использованы в качестве тонкопленочного оптически прозрачного нагревательного элемента смотрового окна видеокамеры. Такое применение пленки ITO было защищено патентом на полезную модель и использовано ИПУ РАН (г. Москва).

Возможность смещения резонансной частоты высокоомных пленок ITO с удельным сопротивлением на уровне $10^4 \text{ Ом}/\square$ в длинноволновую область позволили их применить в качестве антистатического слоя для терморегулирующего покрытия космического аппарата класса оптический солнечный отражатель К-208Ср. Проведенные исследования показали, что введение такого антистатического слоя в состав терморегулирующего покрытия К-208Ср увеличивает коэффициента поглощения солнечного излучения менее чем на 0,005, что является допустимым для эксплуатации терморегулирующего покрытия.

Таким образом, все указанные применения пленок ITO были внедрены, что подтверждается соответствующими актами, приведенными в приложении Б диссертации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

На основании проведенных исследований разработаны технологические основы синтеза низкоомных оптически прозрачных тонких плёнок ITO методом магнетронного распыления, проведены комплексные исследования оптических и электрофизических свойств тонких плёнок ITO с разным содержанием кислорода, а также исследованы многофункциональные покрытия на их основе для приборов оптоэлектроники и радиофотоники.

Анализ результатов проведенных исследований позволил сделать следующие основные выводы.

1. Синтез низкоомных тонких пленок ИТО методом реактивного магнетронного распыления осуществляется при распылении металлической мишени In(90%)/Sn(10%) в смеси газов Ar (при парциальном давлении $3,7 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.) / O₂ (при парциальном давлении $5,2 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст.) и температуре подложки 350 °С при токе разряда 0,3 А с последующим отжигом в вакууме при температуре 450 °С в течение 20 мин. Установлено, что начиная с парциального давления напускаемого кислорода $5,2 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. происходит окисление поверхности распыляемой металлической мишени, в составе плазмы газового разряда возрастает концентрация ионов кислорода и резко снижается концентрация изотопов металлов. Показано, что магнетронное распыление металлической мишени In/Sn в рабочей смеси газов Ar/O₂ с дефицитом кислорода приводит к росту нанокристаллов In₂O₃:Sn в определенном направлении, формируя нанопроволки и наностержни. Последующий высокотемпературный отжиг сформированных наностержней приводит к формированию пористой пленки ИТО. При парциальном давлении кислорода в рабочей камере на уровне $4,0 \cdot 10^{-4}$ – $5,2 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. на подложке формируется сплошная плотная пленка ИТО.

2. Установлено, что процессе высокотемпературного отжига пленок ИТО в вакууме сразу после их осаждения проходит формирование кислородных вакансий, активация примесных атомов олова, а также формирование поликристаллической структуры пленки. Вследствие этого концентрация носителей заряда увеличивается с $6,11 \cdot 10^{20}$ до $7,8 \cdot 10^{20}$ см⁻³, что подтверждает существенную роль кислородных вакансий в процессе электропроводности ИТО, а их подвижность увеличивается с 8,9 до 32,1 см²/(В·с) за счет формирования поликристаллической структуры. Результатом описанных процессов является обеспечение удельного сопротивления ИТО менее $5 \cdot 10^{-4}$ Ом·см. При проведении высокотемпературного отжига пленок ИТО происходит смена механизма их электропроводности с полупроводникового на металлический. Оценка положения уровня Ферми в синтезированных пленках ИТО показала, что уровень Ферми лежит на 0,09–0,125 эВ выше дна зоны проводимости, что указывает на вырождение полупроводника. Коэффициент пропускания низкоомных пленок ИТО в видимой области спектра составляет более 85%, показатель преломления в видимой области спектра находится в диапазоне от 1,82 до 2,17.

3. Концентрация носителей заряда в пленках ИТО, синтезированных методом реактивного магнетронного распыления, зависит от парциального давления кислорода и температуры подложки при напылении и последующем отжиге. При этом получаемая концентрация электронов проводимости может лежать в диапазоне значений от $3 \cdot 10^{19}$ см⁻³ до практически $9 \cdot 10^{20}$ см⁻³. Нижнее значение концентрации электронов в пленках ИТО также может быть уменьшено на порядок путем их анодирования. Воздействие внешнего электрического поля напряженностью более 10⁵ В/см на тонкие пленки ИТО с начальной концентрацией носителей в ее объеме на уровне 10^{18} см⁻³ приводит формированию слоя аккумуляции заряда, который влечет за собой перераспределение концентрации носителей заряда и, как следствие, изменение удельного сопротивления ИТО и изменение показателей преломления и поглощения. Это позволяет использовать тонкие пленки ИТО в качестве канального слоя тонкопленочного МДП-транзистора и плазмонного слоя адсорбционного электрооптического модулятора.

4. Установлено, что при облучении ИТО УФ-излучением за счет разрушения химических связей с атомами газов на поверхности пленок и в приповерхностном слое

происходит генерация носителей зарядов. Максимальную чувствительность к облучению УФ-излучением имеют поликристаллические пленки ИТО с низкой концентрацией электронов проводимости. Генерация дополнительных носителей заряда в ИТО также обусловлена тепловой ионизацией примесных атомов олова. При УФ-экспозиции тонкопленочных структур Al/ИТО/Al на металлических контактных площадках наблюдается рост разницы потенциалов, связанный с разделением сгенерированных носителей зарядов за счет градиента температуры и неравномерности освещенности ИТО. Таким образом продемонстрирована возможность использования ИТО в качестве чувствительного слоя детектора УФ-излучения, а также возможность увеличения чувствительности газовых сенсоров на основе ИТО при их облучении УФ-излучением.

5. Исследованы возможности применения плёнок ИТО в качестве функциональных материалов для приборов электроники. Введение в состав синего светоизлучающего диода на основе гетероструктуры InGaN/AlGaN/GaN оптически прозрачного слоя растекания тока на основе ИТО с тонким металлическим подслоем In + Sn, осажденных по разработанной и внедренной в производство технологии, способствует повышению КПД светодиода более чем в 2 раза относительно применения полупрозрачного контакта Ni/Au. Низкоомные пленки ИТО имеют удовлетворительную стойкость к электрохимическому воздействию химических сред и устойчивость к органическим и неорганическим растворителям, что использовано при проведении химических исследований и разработке электрохромных и фотовольтаических устройств. Использование низкоомных пленок ИТО с удельным поверхностным сопротивлением 5 Ом/□ в качестве оптически прозрачного экрана микроволнового излучения снижает СВЧ сигнал на величину более 33 дБ в диапазоне частот 8–12 ГГц и более 27 дБ в диапазоне частот 24–32 ГГц. Резистивные пленки ИТО использованы в качестве тонкопленочного оптически прозрачного нагревательного элемента смотрового окна видеокамеры. Показана возможность применения высокоомных пленок ИТО в качестве антистатического слоя для терморегулирующего покрытия космического аппарата класса оптический солнечный отражатель.

Результаты диссертационной работы представлены в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий для публикации основных научных результатов диссертаций, в изданиях, индексируемых в международных базах научных публикаций, а также в трудах международных и российских симпозиумов и конференций.

Совокупность изложенных в диссертационной работе результатов исследований, научно обоснованных технических и технологических решений может быть квалифицирована как решение важной хозяйственной проблемы, заключающейся в разработке технологии осаждения тонких пленок ИТО методом магнетронного распыления с контролируемыми электрическими и оптическими характеристиками и их применении для нужд предприятий электронной промышленности.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах из перечня ВАК по специальности 1.3.5 – «Физическая электроника» (технические науки) и в изданиях, индексируемых в базах научных публикаций Scopus и Web of Science, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций:

1. **Жидик, Ю. С.** Фотоэлектрический отклик пленок ИТО при воздействии УФ излучения / Ю. С. Жидик, С. М. Верхаланцев, Д. О. Реннер // Materials. Technologies. Design. – 2026. – Vol. 8, N 1(24). – P. 53–62.

2. **Жидик, Ю. С.** Слой растекания тока на основе пленок ИТО для светодиодов синего цвета свечения / Ю. С. Жидик, Д. И. Засухин, О. Н. Минин, П. Е. Троян // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2025. – № 94. – С. 204–212.

3. Фотонная интегральная схема для системы стабилизации длины волны излучения перестраиваемого лазера С-диапазона / А. А. Шейнбергер, В. Е. Трутнева, М. В. Степаненко, **Ю.С. Жидик**, И.В. Юнусов // Письма в Журнал технической физики. – 2026. – Т. 52, № 10. – С. 29–34.

4. **Zhidik, Y. S.** Determination of optimal ITO current-spreading layer parameters for LEDs based on aligned heterostructures and developing a technology to form such layers on p-GaN surfaces / Y. S. Zhidik // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2025. – Vol. 89, N 10. – P. 1896–1902.

5. **Жидик, Ю. С.** Разработка и изготовление коллимирующей волоконной сферической микролинзы для системы вывода излучения из радиофотонных компонент в оптическое волокно / Ю. С. Жидик, А. А. Шейнбергер, М. В. Степаненко, П. Е. Троян // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2024. – Т. 24, № 6. – С. 871–879. – DOI 10.17586/2226-1494-2024-24-6-871-879.

6. Алгоритм автоматического контроля внешнего вида ИС на основе вычисления пиксельного расстояния / Б. В. Ширяев, Д. П. Аргунов, **Ю. С. Жидик**, А. Ю. Ющенко, И. В. Лаптев // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2024. – Т. 29, № 4. – С. 432–446.

7. Модулятор Маха-Цендера на основе InP с управляемым коэффициентом экстинкции / С. В. Ишуткин, В. С. Арыков, И. В. Юнусов, М.В. Степаненко, В. С. Смирнов, П. Е. Троян, **Ю. С. Жидик** // Журнал технической физики. – 2023. – Т. 93, № 11. – С. 1622–1630.

8. Исследование оптических и фотокаталитических свойств пленок оксида титана разной степени окисления / С. Е. Ручкин, **Ю. С. Жидик**, Ю. Н. Юрьев, А. А. Рунц, Е. Д. Гончарова, А. В. Юрьева // Письма в ЖТФ. – 2022. – Т. 48, вып. 17. – С. 33–36. – DOI 10.21883/PJTF.2022.17.53285.19150.

9. 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. – Т. 10, № 4. – С. 3–8.

10. 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 Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2018. – Т. 21, № 4. – С. 28–32.

11. Данилина, Т. И. Ионно-плазменные методы получения наноструктур / Т. И. Данилина, П. Е. Троян, Ю. В. Сахаров, **Ю. С. Жидик** // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2017. – Т. 20, № 3. – С. 40–45.
12. Сахаров, Ю. В. Исследование механизмов электропроводности пленок оксида индия, легированного оловом / Ю. В. Сахаров, П. Е. Троян, **Ю. С. Жидик** // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2015. – № 3 (37). – С. 85–88.
13. Сахаров, Ю. В. Технология синтеза и свойства пористых оксидных пленок / Ю. В. Сахаров, П. Е. Троян, **Ю. С. Жидик** // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2015. – № 4 (38). – С. 72–75.
14. Троян, П. Е. Прозрачные электропроводящие покрытия с контролируемыми значениями коэффициента пропускания и поверхностного сопротивления / П. Е. Троян, Ю. В. Сахаров, Ю. С. Жидик // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2014. – № 1 (31). – С. 99–102.
15. **Жидик, Ю. С.** Технология формирования покрытий на светодиодных гетероструктурах методом магнетронного распыления на примере нанесения пленок ИТО / Ю. С. Жидик, П. Е. Троян // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2014. – № 4 (34). – С. 52–55.
16. **Жидик, Ю. С.** Технология получения электропроводящих пленок ИТО высокой оптической прозрачности с низким значением величины удельного поверхностного сопротивления / Ю. С. Жидик, П. Е. Троян // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2012. – № 2-2 (26). – С. 169–171.
17. **Жидик, Ю. С.** Расчет теплоотводящего и несущего покрытия при изготовлении светодиодов / Ю. С. Жидик, П. Е. Троян, Д. Д. Каримбаев // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2011. – № 2-2 (24). – С. 73–76.
18. Development of a semiconductor white light source with a high color rendering index / **Yu. S. Zhidik**, I. F. Garipov, S. R. Karpov, M. A. Romanova, P. E. Troyan // Applied Physics. – 2024. – N 6. – P. 81–88. – DOI 10.51368/1996-0948-2024-6-81-88. (*Scopus*)
19. Microassembly of an ultra-wideband electro-optical modulator with an integrated laser / I. V. Yunusov, V. S. Arykov, M. V. Stepanenko, **Yu. S. Zhidik**, K. A. Petruhin, S. P. Ivanichko, A. V. Maikova, M. A. Filyshin // Applied Physics. – 2024. – N 1. – P. 91–95. – DOI 10.51368/1996-0948-2024-1-91-95. (*Scopus*)
20. Study of the Systems for Laser Diode Radiation Output Into a Single-Mode Optical Fiber / A. A. Sheinberger, M. V. Stepanenko, **Yu. S. Zhidik**, S. P. Ivanichko, A. V. Maykova // Photonics Russia. – 2023. – N 7. – P. 526–541. – DOI 10.22184/1993-7296.FRos.2023.17.7.526.538. (*Scopus*)
21. Investigation of the sensitivity of ITO thin films to chemicals adsorbed on their surface / **Yu. S. Zhidik**, K. V. Zhuk, A. A. Ivanova, A. V. Maykova, A. S. Kuzmin, A. V. Mostovshchikov // Applied Physics. – 2023. – N 6. – P. 72–77. – DOI 10.51368/1996-0948-2023-6-72-77. (*Scopus*)
22. Nanoscale ITO Films for Plasmon Resonance-Based Optical Sensors / **Y. Zhidik**, A. Ivanova, S. Smirnov, K. Zhuk, I. Yunusov, P. Troyan // Coatings. – 2022. – N 12 (12). – P. 1868. – DOI 10.3390/coatings12121868. (*Scopus*)
23. Study of the influence of diamond-like carbon film deposition technology on the change of its physical and mechanical characteristics / A. A. Runts, S. E. Ruchin,

Yu. S. Zhidik, A. V. Yurjeva, M. I. Polosukhina // Applied Physics. – 2021. – N 6. – P. 58–62. – DOI 10.51368/1996-0948-2021-6-58-62. (*Scopus*)

24. The Method of Low Temperature ICP Etching InP/InGaAsP Heterostructure in Cl₂-based Plasma for Integrated Optics Applications / S. V. Ishutkin, V. S. Arykov, I. V. Yunusov, M. V. Stepanenko, V. S. Smirnov, P. E. Troyan, **Yu. S. Zhidik** // Micromachines. – 2021. – Vol. 12, N 12. – Article number 1535. – DOI 10.3390/mi12121535.

25. Electrical Conductivity and Optical Properties of Nanoscale Titanium Films on Sapphire for Localized Plasmon Resonance-Based Sensors / K. Korotkova, D. Bainov, S. Smirnov, I. Yunusov, **Yu. Zhidik** // Coatings. – 2020. – Vol. 10, N 12. – P. 1–7. – DOI 10.3390/coatings10121165. (*Scopus*)

26. Multi-Parameter Optimization of an InP Electro-Optic Modulator / M. Stepanenko, I. Yunusov, V. Arykov, P. Troyan, **Yu. Zhidik** // Symmetry. – 2020. – Vol. 12, N 11. – P. 1–18. – DOI 10.3390/sym12111920. (*Scopus*)

27. Technological Development of an InP-Based Mach–Zehnder Modulator / S. Ishutkin, V. Arykov, I. Yunusov, M. Stepanenko, P. Troyan, **Yu. Zhidik** // Symmetry. – 2020. – Vol. 12, N 12. – P. 1–10. – DOI 10.3390/sym12122015. (*Scopus*)

28. Investigation of electrophysical properties of ITO films / **Yu. S. Zhidik**, P. E. Troyan, V. V. Kozik, S. A. Kozyukhin, A. V. Zabolotskaya, A. S. Kuznetsova // Russian Physics Journal. – 2020. – Vol. 63, N 7. – P. 1139–1143. (*Scopus*)

29. **Zhidik Yu. S.** Structure and properties of ITO thin films obtained by reactive magnetron sputtering / Yu. S. Zhidik, A. A. Chistoedova, E. V. Zhidik, A. E. Petryuk // Applied Physics. – 2020. – N 2. – P. 59–63. (*Scopus*)

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:

33. **Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2021669291**, Российская Федерация. Программа для расчёта спектральных характеристик коэффициентов пропускания и отражения систем тонкая пленка – оптически прозрачная подложка: № 2021668365; заявл. 19.11.2021; опубл. 25.11.2021 / Иванова А. А., Смирнов С. В., **Жидик Ю. С.**; правообладатель ТУСУР. – 1 с.

34. **Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2021680950**, Российская Федерация. Расчёт состава слоев мультиквантовых ям DFB лазера: № 2021680114; заявл. 10.12.2021; опубл. 16.12.2021 / Арыков В. С., **Жидик Ю. С.**, Степаненко М. В., Троян П. Е., Юнусов И. В.; правообладатель ТУСУР. – 1 с.

35. **Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2020665304**, Российская Федерация. InGaAsP/InP MQW EOM Optimazer: № 2020664288; заявл. 19.11.2020; опубл. 26.11.2020 / Степаненко М. В., Юнусов И. В., Арыков В. С., Троян П. Е., **Жидик Ю. С.**; правообладатель ТУСУР. – 1 с.

36. **Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2019660654**, Российская Федерация. Picture Marker: № 2019619407; заявл. 29.07.2019; опубл. 09.08.2019 / **Жидик Ю. С.**, Ишуткин С. В., Троян П. Е.; правообладатель ТУСУР. – 1 с.

37. **Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2019660761**, Российская Федерация. Reticle Mapper: № 2019619323; заявл. 29.07.2019; опубл. 13.08.2019 / **Жидик Ю. С.**, Ишуткин С. В., Троян П. Е.; правообладатель ТУСУР. – 1 с.

38. **Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2019662832**, Российская Федерация. Transformation XY to UV: № 2019619410; заявл. 29.07.2019; опубл. 03.10.2019 / **Жидик Ю. С.**, Ишуткин С. В., Троян П. Е.; правообладатель ТУСУР. – 1 с.

Патенты Российской Федерации:

39. **Патент на полезную модель** № 222410 U1, Российская Федерация, МПК G02B 6/32. Оптический соединитель: № 2023130226: заявл. 21.11.2023: опубл. 22.12.2023 / **Жидик Ю. С.**, Степаненко М. В., Цехановская М. С., Шейнбергер А. А. ; заявитель ТУСУР. – 5 с.

40. **Патент на полезную модель** № 202078 U1, Российская Федерация, МПК H01L 21/68. Адаптер полупроводниковой пластины: № 2020131796: заявл. 28.09.2020: опубл. 29.01.2021 / **Жидик Ю. С.**, Ишуткин С. В., Троян П. Е. ; заявитель ТУСУР. – 9 с.

41. **Патент на изобретение** № 2729964 C1, Российская Федерация, МПК H01L 21/28. Способ формирования оптически прозрачного омического контакта к поверхности полупроводникового оптического волновода электрооптического модулятора: № 2019141844: заявл. 17.12.2019: опубл. 13.08.2020 / **Жидик Ю. С.**, Ишуткин С. В., Троян П. Е. ; патентообладатель ТУСУР. – 9 с.

42. **Патент на изобретение** № 2601903 C2, Российская Федерация, МПК C23C 14/35, H01J 37/317, H01J 37/34. Способ напыления тонкопленочных покрытий на поверхность полупроводниковых гетероэпитаксиальных структур методом магнетронного распыления: № 2015108566/02: заявл. 11.03.2015: опубл. 10.11.2016 / Троян П. Е., **Жидик Ю. С.**, Гуменова Г. И. ; патентообладатель ТУСУР. – 7 с.

43. **Патент на изобретение** № 2528128 C1, Российская Федерация, МПК H01L 33/00, H01L 51/50. Способ изготовления органического светоизлучающего диода: № 2013110202/28: заявл. 06.03.2013: опубл. 10.09.2014 / **Жидик Ю. С.**, Троян П. Е. ; патентообладатель ТУСУР. – 5 с.

44. **Патент на полезную модель** № 144827 U1, Российская Федерация, МПК H05B 3/84. Тонкопленочный нагревательный элемент: № 2014109514/07: заявл. 12.03.2014: опубл. 10.09.2014 / **Жидик Ю. С.**, Троян П. Е., Сахаров Ю. В. ; заявитель ТУСУР. – 4 с.

Статьи в прочих научных изданиях:

45. **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 Московского авиационного института. – 2016. – Т. 23, № 2. – С. 160–166.

46. Troyan, P. Investigation of temperature stability of ITO films characteristics / P. Troyan, **Yu. Zhidik**, E. Zhidik // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 143. – Article number 03010. – DOI 10.1051/mateconf/201814303010.

47. **Zhidik, Yu. S.** Deposition of the low resistive ITO-films by means of reactive magnetron sputtering of the In/Sn target on the cold substrate / Yu. S. Zhidik, P. E. Troyan, E. V. Baturina, D. V. Korzhenko, Yu. N. Yurjev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Article number 012055. – DOI 10.1088/1757-899X/110/1/012055.

48. **Жидик, Ю. С.** Полифункциональные пленки ИТО для устройств фотоники / Ю. С. Жидик // Сборник научных трудов всероссийской научной конференции с международным участием «Невская фотоника-2025». – СПб., 2025. – С. 168.

49. **Zhidik, Y. S.** Magnetron sputtering deposition of ITO films on semiconductor heteroepitaxial structures surface / Y. S. Zhidik // 9th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects. – Tomsc, 2024. – P. 362.

50. **Жидик, Ю. С.** Исследование влияния высокотемпературного отжига пленок ИТО на их электрофизические свойства / Ю. С. Жидик, А. А. Чистоедова, Е. В. Жидик,

С. В. Смирнов // Взаимодействие излучений с твердым телом: материалы 13-й Международной конференции / редкол.: В. В. Углов [и др.]. – 2019. – С. 386–389.

51. **Жидик, Ю. С.** Влияние электронно-ионной бомбардировки на процесс формирования и свойства пленок сложного состава ионно-плазменным методом / Ю. С. Жидик, А. А. Чистоедова, Е. В. Жидик, Т. И. Данилина // Взаимодействие излучений с твердым телом: материалы 13-й Международной конференции / редкол.: В. В. Углов [и др.]. – 2019. – С. 446–449.

52. Sakharov, Y. Energy efficient sensors based on carbon-modified silica films / Y. Sakharov, P. Troyan, Yu. Zhidik // International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2019 - Proceedings. – 2019. – Article number 8729582. – DOI 10.1109/SIBCON.2019.8729582.

53. **Zhidik, Yu. S.** Influence of gas discharge plasma on forming process and properties of complex films / Yu. S. Zhidik, T. I. Danilina, A. A. Chistoedova, E. V. Zhidik, L. R. Bitner // Journal of Physics: Conference Series. The proceeding 14th International Conference "Gas Discharge Plasmas and Their Applications". – Institute of High-Current Electronics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2019. – Article number 012154.

54. **Жидик, Ю. С.** Разработка технологии напыления пленок ИТО методом магнетронного распыления и ее адаптация в условиях промышленного производства / Ю. С. Жидик, П. Е. Троян, Ю. В. Сахаров // Технология микро- и нанoeлектроники в наносистемной технике: труды 5-й международной научно-практической конференции. – М., 2016. – С. 87–89.

55. 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, **Yu. S. Zhidik**, Yu. V. Sakharov // International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM. Proceedings. – 2014. – P. 98–101.

56. **Жидик, Ю. С.** Технология формирования катодно-анодной части органических светоизлучающих диодов / Ю. С. Жидик, Ю. В. Сахаров, П. Е. Троян // Пленки и покрытия-2013: труды 11-й Международной конференции. – 2013.