

На правах рукописи

Лотков Евгений Сергеевич

Разработка и исследование методов создания электрооптического модулятора с низкими потерями для фотонных интегральных схем

Специальность 2.2.3. Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук



Москва – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель:

доктор технических наук,
профессор **Панфилов Юрий Васильевич**

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
Белянин Алексей Федорович,
ведущий научный сотрудник
МИРЭА – Российский технологический
университет

кандидат физико-математических наук,
Маклаков Сергей Сергеевич,
ведущий научный сотрудник
Института теоретической и прикладной
электродинамики РАН

Ведущая организация:

**АО «Научно-исследовательский институт
точного машиностроения»**

Защита диссертации состоится «10» октября 2024 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета 24.2.331.16 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2024 г.

Телефон для справок: 8 (499) 263-66-33 *3628

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.331.16
кандидат технических наук



Сырицкий Антони Борисович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Для перспективных направлений интегральной фотоники: квантовых фотонных вычислений, сенсорики, фотонных искусственных нейронных сетей, средств телекоммуникации нового поколения (например, сотовая связь 6G) необходимо использование сверхвысокочастотных электрооптических модуляторов. Эти устройства служат для преобразования оптического сигнала и должны обладать минимальными потерями, неограниченно высокой пропускной способностью и сравнимой с электронными компонентами плотностью интеграции.

Разработкой материалов, конструкций и технологий изготовления электрооптических модуляторов, использующих различные физические эффекты, занимались многие ученые, основные из которых: М. Лонкар (M. Loncar) из университета Гарварда, США (электрооптические модуляторы на основе ниобата лития), Ю. Лойтхольд (J. Leuthold) из Швейцарской высшей технической школы Цюриха, Швейцария и Л. Далтон (L. Dalton) из университета Вашингтона, США (электрооптические модуляторы на основе полимерных материалов), Ю. Власов в составе компании IBM, США, Т. Баба (T. Baba) из университета Иокогама, Япония (кремниевые электрооптические модуляторы), Ф. Зоргер (V. Sorger) из университета Флориды, США, В. Драчев из Сколковского института науки и технологий, Россия (электрооптические модуляторы на основе прозрачных проводящих оксидов).

Для повышения эффективности электрооптического переключения в модуляторах и снижения вносимых ими потерь на сегодняшний день были разработаны модели: распространения излучения в гибридном волноводе, распространения излучения в волноводах замедленного света для кремниевых гетеропереходов, распространения излучения в фотонных кристаллах на основе нанополостей, распространения излучения в щелевых плазмонных и гибридных волноводах. Так используя гибридный волновод, построенный в фотонном кристалле, в 2018 году был рассчитан и экспериментально подтвержден переход ТЕ поляризованной моды в резонансное состояние в слое прозрачного проводящего оксида с точкой эpsilon близкой к нулю (epsilon near zero – ENZ) с сопровождающимся поглощением резонансной моды и реализовано переключение интенсивности 5,6 дБ на участке всего 0,375 мкм с рекордными оптическими потерями 0,5 дБ. Однако такие модуляторы не предназначены для фазового переключения.

До сих пор не найдены оптимальные решения для создания модуляторов имеющих одновременно высокую плотность интеграции, низкие потери и возможность переключения фазы. Необходим поиск компромисса между основными характеристиками так, чтобы они соответствовали требованиям конкретной фотонной интегральной схемы (ФИС). Одним из приспособленных типов устройств к такому компромиссу являются электрооптические модуляторы на основе прозрачных проводящих оксидов, в том числе на основе оксида индия-олова (ИТО), который является гибким материалом в плане электрических и оптических характеристик, что приводит к возможности создавать модуляторы как

интенсивности так и фазы с низкими потерями, а также позволяет использование как плазмонных, так и фотонных конструкций.

Однако модуляторы данного типа не проработаны технологически: нет экспериментальных исследований влияния морфологии ИТО на электрооптические свойства, исследований характеристик и стабильности элементов микрометровых размеров. Поэтому вносимые потери и коэффициент экстинкции могут быть улучшены. Кроме того, показано недостаточное количество физических моделей работы устройства, и утверждается, что конструкция такого типа модуляторов может быть оптимизирована.

Степень разработанности темы исследования. Существует множество видов активных элементов, построенных на различных материалах, способных изменять свои оптические свойства под воздействием электрического поля или заряда. В последнее время демонстрируются перспективные разработки устройств на основе платформ ниобата лития и фосфида индия, подготовленные для сборки в конечный продукт и использование в системах обработки данных в качестве отдельных самостоятельных элементов или для сборки в схему трансивера посредством объединения этих платформ с комплементарными структурами металл-оксид-полупроводник (КМОП). На ряду с этим, появляется множество фотонных интегральных схем, где требуется совместимая с технологией КМОП интеграция активных оптических элементов на один чип для уменьшения общих вносимых схемой потерь вплоть до единиц дБ.

Особенно перспективной фотонной технологической платформой выделяется нитрид кремния на изоляторе, которая позволяет создавать схемы с широким рабочим диапазоном длин волн (от 400 до 3000 нм) и самыми низкими существующими на данный момент оптическими потерями пассивных элементов (менее 0,001 дБ/см). Разработка совместимых с технологией КМОП электрооптических модуляторов на платформе из нитрида кремния на изоляторе является относительно новым направлением. В последние годы показано несколько решений на основе тонкопленочных структур титаната бария с эффектом Поккельса. Минимальные потери таких модуляторов составляют 1,6 дБ для фотонных и более 20 дБ для плазмонных реализаций. Следует отметить, что для формирования структур титаната бария с низкими потерями требуется молекулярно-лучевая эпитаксия на специальном затравочном слое с последующим переносом материала на волноводную схему Si_3N_4 , что затрудняет интеграцию активного элемента модуляторов данного типа.

Все доступные для анализа фотонные интегральные схемы на платформе из нитрида кремния реализованы на базе термооптических модуляторов с низкими потерями, однако их частота переключения остается в пределах кГц. Так приложения квантовой фотоники требуют потери модуляторов на уровне 0,1 дБ, а скорость переключения единицы ГГц. Межсоединения центров обработки данных и фотонных нейроморфных и классических вычислительных систем требуют субмикрометровых размеров оптических модуляторов для достижения плотности интеграции сравнимой с плотностью электронных компонентов, энергоэффективности на уровне аДж/бит, а также неограниченно высокой

электрической полосы пропускания (более 1 ТГц). Таким образом, современные электрооптические модуляторы не соответствуют технологическим и прикладным требованиям фотонных интегральных схем.

Целью диссертационной работы является обеспечение характеристик электрооптических модуляторов, требуемых современными фотонными интегральными схемами, путем научно-обоснованного выбора режимов формирования совместимых с технологией КМОП тонкопленочных микроструктур.

Основные решаемые задачи:

1. Определены требования, при которых электрооптический модулятор будет востребован в современных фотонных интегральных схемах.

2. Разработан алгоритм расчета электрооптического модулятора на основе оксида индия-олова с учетом электрических и оптических характеристик отдельных элементов, позволяющая проводить численные расчеты потерь и эффективности устройства.

3. Разработана технология осаждения тонкопленочных покрытий и формирования микрометровых элементов, в которых происходит модуляция оптического сигнала, и экспериментально проанализированы зависимости характеристик электрооптического переключения от технологических режимов.

4. Установлены экспериментальные зависимости влияния параметров процесса электронно-лучевого испарения с ионным ассистированием и конфигурации оборудования на воспроизводимость электрических характеристик структур оксида индия-олова.

5. Разработана схема измерения оптических и высокочастотных характеристик электрооптического модулятора.

6. Разработана технология изготовления интегрального электрооптического модулятора на платформе из нитрида кремния.

Научная новизна работы:

1. Разработан метод расчета потерь и эффективности активного элемента плазмонного электрооптического модулятора на основе прозрачных проводящих оксидов с учетом электрических характеристик тонких пленок и поляризации вводимого излучения.

2. Выявлена взаимосвязь режимов формирования оксида индия-олова для использования в активном элементе оптического модулятора методом комбинации электронно-лучевого испарения, ионного ассистирования и последующего отжига с возможностью получения кристаллической структуры и требуемого для электрооптических модуляторов диапазона концентрации электронов.

3. Получено требуемое сочетание электрического сопротивления и коэффициента поглощения микрометровых элементов оксида индия-олова при использовании комбинации взрывной литографии, удаления резиста, отжига оксида индия-олова и термического атомно-слоевого осаждения, обеспечивающее минимальные внутренние потери оптического модулятора.

4. Предложен и реализован новый метод измерения потерь и эффективности плазмонного электрооптического модулятора с учетом поляризационно-зависимого соединения фотонной и плазмонной моды в гибридном волноводе.

Практическая значимость. На основе проведенных в работе исследований технологических методов и режимов разработан маршрут создания электрооптического модулятора, использующего прозрачные проводящие оксиды. Представлены рекомендации по измерениям характеристик электрооптических модуляторов. Проведены приемо-сдаточные испытания фотонного СВЧ оборудования с использованием опытных образцов изготовленных электрооптических модуляторов.

Результаты внедрения. Разработанный базовый маршрутный технологический процесс, методики и модели использованы при реализации НИОКР, проводимых совместно ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова» и МГТУ им. Н.Э. Баумана, что подтверждено соответствующими актами.

Методы исследования. Для решения поставленных задач в работе проведены экспериментальные исследования по определению зависимости параметров устройства от режимов нанесения тонкопленочных структур, в том числе чувствительного слоя оксида индия-олова. Для достижения поставленной цели изготовлено и охарактеризовано более 250 экспериментальных образцов, а также разработано и изготовлено более 5 стендов и оснасток для тестирования параметров многослойных покрытий активного элемента. Для контроля параметров пленок и структур использовались следующие методы их измерения: эллипсометрия, сканирующая электронная микроскопия, дифракция обратно-рассеянных электронов, энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия, стилусная профилометрия, четырехзондовый метод измерения сопротивления, зондовые измерения вольтамперных характеристик.

Достоверность полученных результатов, выводов и рекомендаций диссертационной работы обусловлена использованием современного поверенного метрологического оборудования, проведенных экспериментальных исследований, согласованностью теоретических и экспериментальных результатов, а также внедрением разработанных методик и режимов работы технологического оборудования в НИР, проводимых НОЦ «ФМНС» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Создание модулятора, сопрягаемого с волноводом из нитрида кремния толщиной более 300 нм для длины волны 1550 нм при использовании ТМ поляризации или включающего в себя плазмонные элементы, обеспечивающие взаимодействие с ТЕ модой, дает возможность изменять амплитуду более 0,005 дБ/(В·мкм) и фазу более 0,0015 рад/(В·мкм).

2. Комбинация электронно-лучевого испарения с ассистированием ионами кислорода с необходимой энергией и последующего отжига в смеси O₂ и Ar с требуемым диапазоном температур позволяет получать равномерную по площади кристаллическую структуру оксида индия-олова с пониженной концентрацией

электронов в диапазоне от $5 \cdot 10^{19}$ до $2 \cdot 10^{20}$ см⁻³ при латеральных размерах элемента не менее 90 мкм².

3. Структуры оксида индия-олова, нанесенные электронно-лучевым испарением с ионным ассистированием, состоят из кристаллических зародышей, окруженных аморфными участками материала с повышенной концентрацией внедренного в объем кислорода. При последующем отжиге кристаллизация происходит по каналам диффузии внедренного кислорода к радиально растущим кристаллическим участкам. Температура отжига, при которой достигается кристаллизация, обеспечивающая необходимый уровень удельного сопротивления, тем ниже, чем больше энергия ионов при осаждении и количество кислорода в газовой смеси, при общей площади элемента, обеспечивающей достаточное количество сверхстехиометрического кислорода для формирования кристаллической структуры, что подтверждается зависимостью удельного сопротивления от его латеральных размеров.

4. В процессе изготовления электрооптического модулятора сопротивление и коэффициент поглощения оксида индия-олова претерпевают изменения, что влияет на потери устройства. При использовании комбинации взрывной литографии, удаления резиста при комнатной температуре, отжига оксида индия-олова и атомно-слоевого осаждения при температуре не более 300°C сопротивление материала уменьшается не более чем в 2 раза и коэффициент поглощения не превышает 0,18 на длине волны 1550 нм, что обеспечивает внутренние потери модулятора не более, чем 0,7 дБ/мкм.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на 7 российских и международных конференциях: Международная конференция по фотонике и информационной оптике. Москва (МИФИ), 2019; Международная конференция V International Conference on Metamaterials and Nanophotonics METANANO. Онлайн, 2020; Российская конференция Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества II РФИВ. Омск, 2022; Российская Научно-техническая конференция НТК ВНИИА. Москва, 2021, 2022, 2023, 2024; а также на научных семинарах кафедры «Электронные технологии в машиностроении» и НОЦ ФМН МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Публикации. По материалам и основному содержанию работы опубликовано 15 научных работ в научно-технических журналах и трудах конференций, из них 10 в научно-технических журналах, находящихся в базах данных Web of Science и Scopus, и 2 научных работы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Личный вклад. Автор самостоятельно провел поиск и анализ литературных источников. Экспериментальные и расчетные данные, а также данные моделирования получены автором лично или с его непосредственным участием. Лично отработал процесс формирования тонких пленок и структур оксида индия-олова методом электронно-лучевого испарения с ионным ассистированием. Принимал непосредственное участие в процессе проектирования электрооптического модулятора, расчета ключевых параметров и разработки базового технологического маршрута с последующим изготовлением устройства.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов и списка литературы. Материалы диссертации изложены на 130 страницах, включают 55 рисунков, 13 таблиц, список литературы из 147 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, обоснована научная новизна, а также приведены положения, выносимые на защиту.

В Главе 1 создана классификация интегральных электрооптических модуляторов по эффекту взаимодействия сигнала с излучением, по чувствительному материалу, по конструкционному исполнению, по форме распространяющейся оптической моды и по технологической платформе.

Наиболее перспективными типами выделены электрооптические модуляторы на основе эффекта дисперсии свободных носителей заряда в кремнии и прозрачных проводящих оксидах, электрооптические модуляторы на основе эффекта Погкельса в синтезированных материалах, ниобате лития, титанате бария, цирконате-титанате свинца, электрооптические модуляторы на основе эффектов, возникающих в квантовых ямах, на основе гетероструктур. Все эти типы обладают потенциалом для реализации обработки данных с полосой пропускания более 100 ГГц и потерями менее 1 дБ. Однако большинство перспективных электрооптических модуляторов требуют отдельной платформы не совместимой с КМОП технологией и с платформами, на которых строятся современные фотонные интегральные схемы (например, кремний или нитрид кремния на изоляторе).

Представлен обзор внедрений оптических модуляторов в современные ФИС центров обработки данных, систем LiDAR, нейроморфных и квантовых вычислений. Для квантовых, нейроморфных вычислений и для обеспечения плотной интеграции в схемах систем обработки данных требуются электрооптические модуляторы с полными потерями около 0,1 дБ на длине волны 1550 нм, максимальным напряжением переключения сотни мВ, для всех применений требуется минимально возможная полоса пропускания единицы ГГц, а для систем обработки данных – 1 ТГц.

Среди наиболее перспективных типов выбран электрооптический модулятор на основе оксида индия-олова (ИТО) в плазмонном исполнении. Он демонстрирует компромисс между низкими потерями (продемонстрировано 0,5 дБ – абсорбирующий, 6 дБ – интерферометр Маха-Цендера), небольшими размерами (длина активного элемента до 1,6 мкм) и высокой частотой модуляции (продемонстрировано более 40 ГГц), что делает его одним из наиболее перспективных решений. Оксид индия-олова является гибким материалом в плане электрических и оптических характеристик, что приводит к возможности создавать модуляторы как интенсивности, так и фазы с низкими потерями и высокой электрической полосой пропускания, а также совместим с планарной кремниевой технологией, что упрощает производство и монолитную интеграцию с

электроникой. В качестве технологической платформы для разрабатываемого электрооптического модулятора будет нитрид кремния на изоляторе.

Реализация электрооптических модуляторов на основе оксида индия-олова требует создание пассивной волноводной схемы и покрывающего активного элемента в виде конденсатора металл-оксид-полупроводник (МОП) со встроенным сверхтонким слоем ИТО. Однако модуляторы данного типа не проработаны технологически: нет экспериментальных исследований влияния морфологии ИТО на электрооптические свойства, исследований характеристик и стабильности элементов микрометровых размеров. Поэтому вносимые потери и коэффициент экстинкции могут быть улучшены. Кроме того, показано недостаточное количество физических моделей работы устройства, и утверждается, что конструкция такого типа модуляторов может быть оптимизирована.

Глава 2 посвящена технологическому анализу электрооптического модулятора на основе оксида индия-олова на платформе из нитрида кремния, проведенному с помощью моделирования оптических мод и расчета электрического заряда на интерфейсах слоев (Рисунок 1). Для разработки физической модели работы активного элемента было проведено моделирование распространения излучения длиной волны 1550 нм в фотонном и гибридном волноводах и в переходе между ними при ТЕ и ТМ поляризациях в типовой конструкции с горизонтальным распределением электрического поля. В волноводе Si_3N_4 в воздушной верхней оболочке фундаментальная ТМ мода возникает при толщинах от 300 нм, а в оболочке SiO_2 при толщинах менее 220 нм. Из-за ограничения по толщине нитрида кремния для простых конструкций гибридного волновода возможна работа только с ТМ поляризацией. Для создания конструкции, работающей в ТЕ поляризации, могут быть рассмотрены нанополости, направленные делители, и продольные полосы из металла.

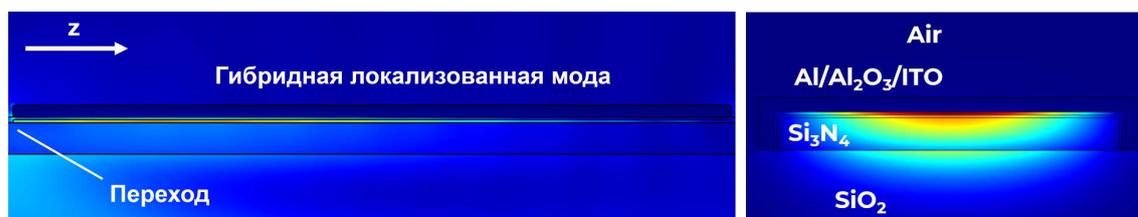


Рисунок 1. Результаты моделирования электрооптического модулятора на основе ТМ моды по длине распространения (ось z), толщина нитрида кремния – 300 нм

Проведен объединенный расчет электрических характеристик оксида индия-олова в МОП-конденсаторе в конфигурации Маха-Цендера с моделированием оптической ТМ моды внутри гибридного волновода и моделированием электрического заряда на интерфейсах диэлектрика (Al_2O_3) при напряжении ± 7 В. Учитывая компромисс между оптическими потерями (Рисунок 2, а) и эффективностью переключения потерь и фазы (Рисунок 2, б), оптимальный диапазон концентрации электронов в оксиде индия-олова составляет от $0,5$ до $2,0 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$.

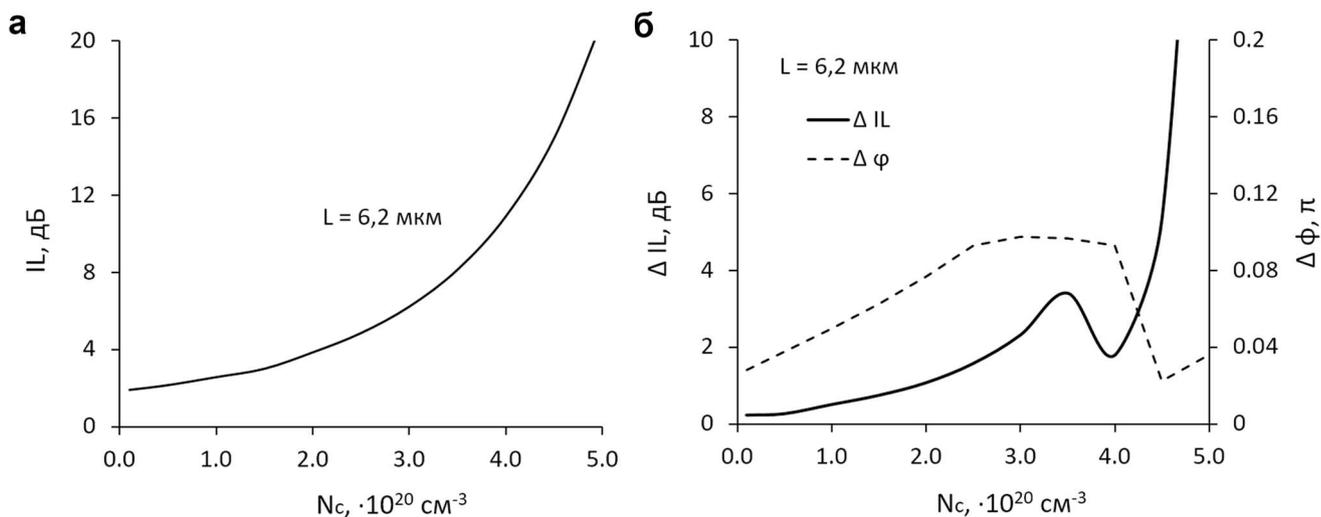


Рисунок 2. Зависимость параметров устройства от исходной концентрации электронов в ИТО при ± 7 В (диэлектрик Al_2O_3): а – потери (IL); б – изменение IL , ϕ

Разработана топология активного элемента длиной 6,2 мкм. Для работы с ТМ поляризацией с точки зрения минимизации оптических потерь и выполнения условий одномодового распространения выбран волновод шириной 2900 нм для воздушной верхней оболочки и волновод шириной 1200 нм для верхней оболочки SiO_2 . Элементы ИТО имеют площадь 240 мкм² с расширениями для контактных областей. Предусмотрена возможность использования металлического слоя для защиты ИТО в процессе вскрытия окон в диэлектрике жидкостным травлением. На одном образце размещены однопортовые и двухпортовые (Рисунок 3) версии электродов модулятора для исследования паразитных отражений микроволн. Предусмотрена возможность покрытия волноводной схемы с модуляторами слоем SiO_2 толщиной 2500 нм с последующим вскрытием контактных окон. Кроме того, для контроля сопротивления ИТО на всех этапах изготовления предусмотрены элементы площадью от $3 \cdot 10$ до $9 \cdot 2500$ мкм².

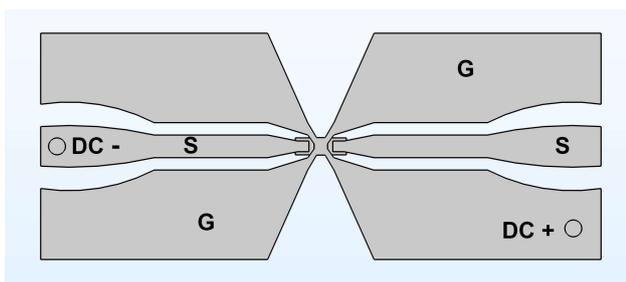


Рисунок 3. Топология двухпортового активного элемента (волновод не показан)

полные потери активного элемента модулятора в ТМ поляризации составляют 2,5 дБ (в воздушной верхней оболочке) и 3,4 дБ (покрытый SiO_2). Исходя из расчета импеданса и времени зарядки активного элемента пропускная способность составляет не менее 1 ГГц.

Глава 3 разделена на две части и посвящена разработке и исследованию технологии осаждения сверхтонких пленок оксида индия-олова для применения в электрооптических модуляторах. В первой части главы предложена и описана методика электронно-лучевого испарения с ионным ассистированием (ion beam

assisted evaporation, ИВАЕ) с последующим отжигом, которая обеспечивает универсальный и точный контроль концентрации носителей заряда. В отличие от магнетронного распыления и ионно-лучевого осаждения предлагаемый процесс ИВАЕ характеризуется более низкими энергиями, что позволяет избежать интенсивной кристаллизации и образования переходного слоя, а также является гибким методом, который позволяет наносить в условиях сверхвысокого вакуума чрезвычайно чистые материалы с малой скоростью и при необходимости позволяет проводить ионное ассистирование во время процесса. Последующий отжиг позволяет дополнительно улучшить поликристаллическую структуру и свойства пленки без существенного увеличения концентрации электронов.

Получены экспериментальные зависимости микроструктуры и удельного сопротивления ИТО от количества кислорода, ускоряющего тока, энергии при ионном ассистировании, от скорости осаждения и температуры. Установлено, что для получения требуемого диапазона удельного сопротивления требуется последующий отжиг. С помощью отжига в атмосфере аргона и смеси аргон/кислород было достигнуто контролируемое влияние на этот параметр (Рисунок 4). По предложенной методике были нанесены пленки ИТО толщиной 20 ± 1 нм с широким диапазоном концентрации носителей заряда (от 1 до $6 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$) и среднеквадратичной шероховатостью поверхности от 0,5 до 0,7 нм.

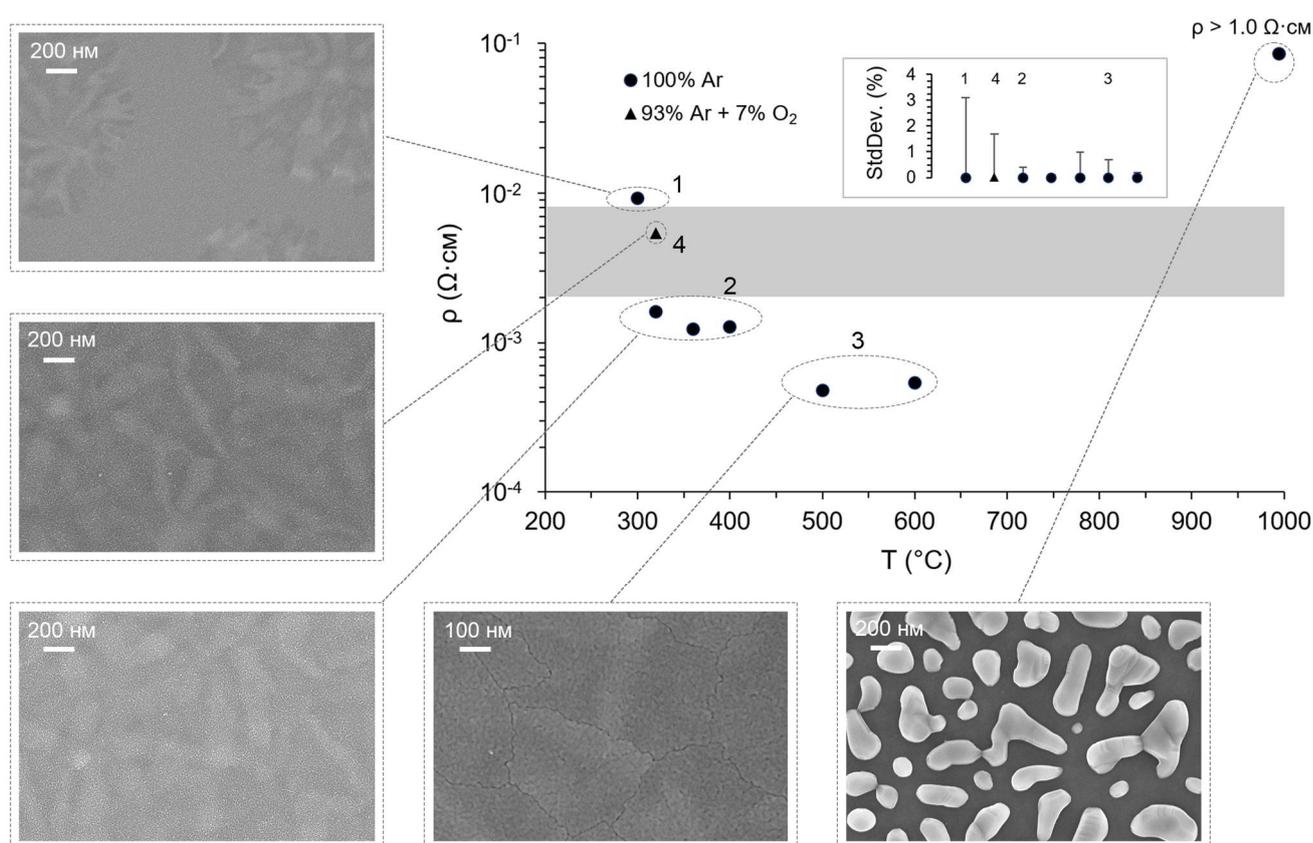


Рисунок 4. Зависимость удельного сопротивления от температуры и атмосферы отжига для пленок ИТО толщиной 20 нм (ИВАЕ при комнатной температуре). На графике закрашен требуемый диапазон для ρ ; СЭМ-изображения поверхности пленок ИТО для каждой области параметров отжига

В результате исследования микроструктуры методом дифракции обратного рассеяния электронов было установлено, что в процессе ионного ассистирования в объеме пленки ИТО формируются кристаллические зародыши из-за внедренных атомов или ионов кислорода. При последующем отжиге эти зародыши разрастаются, кристаллизуя пленку в радиальном направлении, оставляя вокруг участки с аморфной структурой. При достижении полной кристаллизации энергия отжига тратится на количественное уменьшение границ между зернами.

Для количественной оценки электрооптического эффекта были спроектированы, изготовлены и испытаны МОП-структуры на основе тонких пленок ИТО и термически выращенного оксида на легированном кремнии р типа ($N_c = 10^{19} \text{ см}^{-3}$). Предложена и экспериментально оценена модель, объясняющая напряжения пробоя для различных типов электродов МОП-конденсаторов с миллиметровыми площадями. МОП структура с серебряным электродом на поверхности ИТО продемонстрировала значительно более высокое напряжение пробоя (от 17 до 29 В) по сравнению с алюминиевым (менее 20 мВ).

Разработана методика измерений электрооптического эффекта методом эллипсометрии с фокусировкой на микропятно размером около 200 мкм. Спроектировано и изготовлено несколько видов оснасток для проведения эксперимента. В результате была продемонстрирована электрооптическая модуляция комплексного показателя преломления ряда пленок ИТО, отличающихся друг от друга температурой при осаждении и наличием последующего отжига (Рисунок 5, а, б – параметры ψ и Δ при 1550 нм и n и k в диапазоне длин волн от 550 до 1600 нм для пленки тип 2 – осажденной ИВАЕ при комнатной температуре).

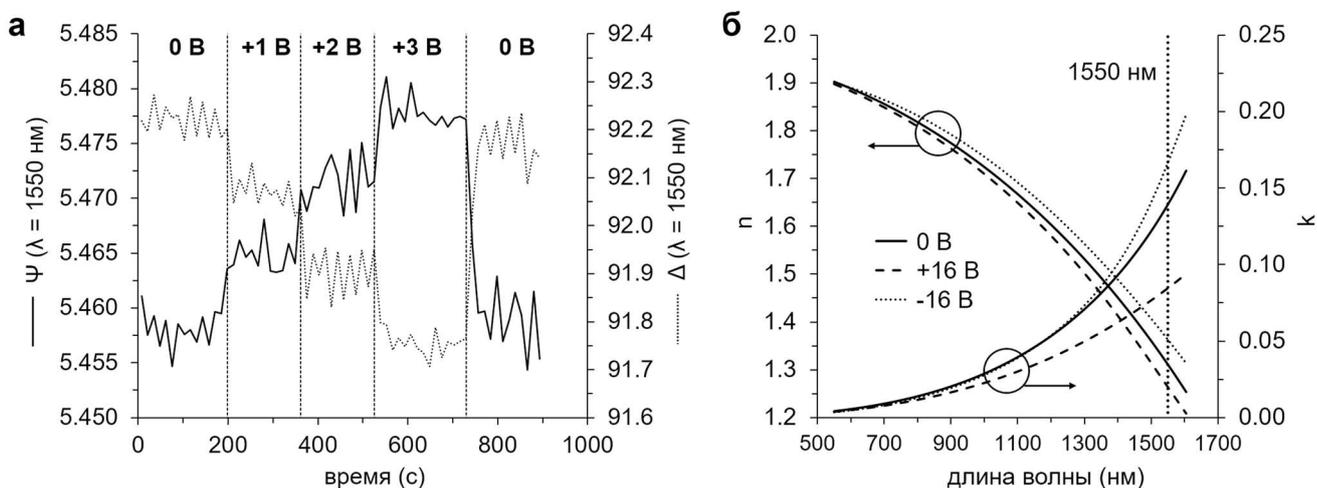


Рисунок 5. Измерения электрооптического эффекта: а – Параметры ψ и Δ многослойной структуры на длине волны 1550 нм; б – n и k в диапазоне длин волн от 550 до 1600 нм при напряжении ± 16 В на диэлектрике SiO_2 (пленка ИТО тип 2)

Экспериментально установлено что пленки ИТО, осажденные ИВАЕ при повышенной температуре без последующего отжига (тип 1), имели наихудший электрооптический эффект, тогда как в отожженных пленках (тип 2 и тип 3) динамика изменений значений оптических констант с изменением концентрации электронов соответствовала модели Друде-Лоренца (Рисунок 6, а, б).

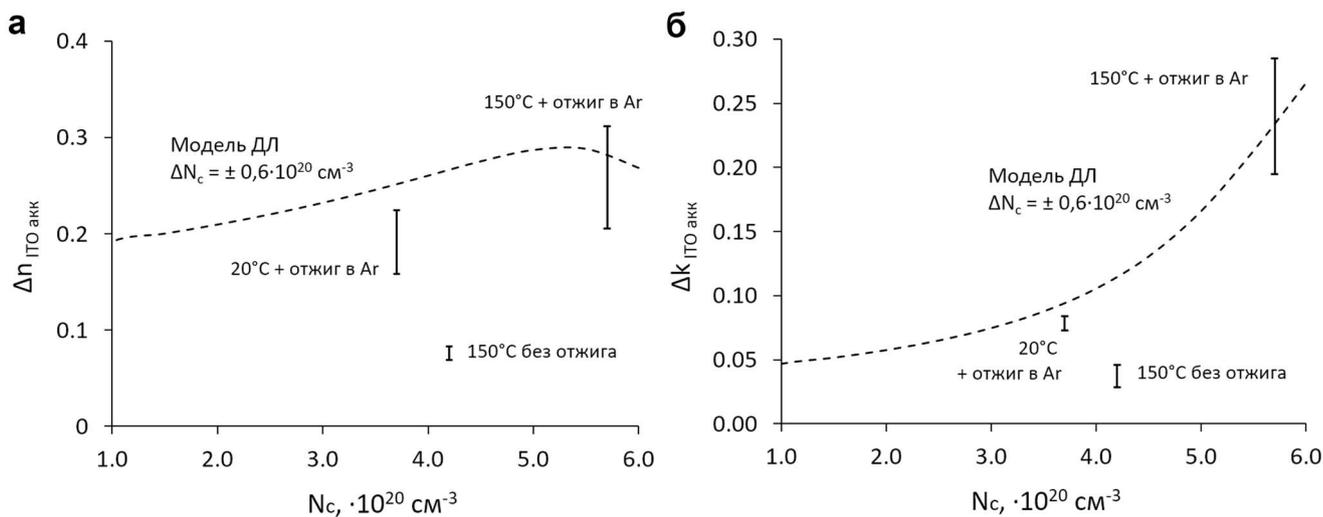


Рисунок 6. Зависимость электрооптического эффекта в аккумулирующем слое от режимов осаждения на длине волны 1550 нм: а – Δn ; б – Δk

Максимальное значение электрооптической модуляции многослойных структур составило $\Delta n = 0,258 \pm 0,063$, $\Delta k = 0,240 \pm 0,045$ на длине волны 1550 нм в диапазоне напряжений от +16 до -16 В, что соответствует изменению концентрации электронов $\Delta N_c = 0,6 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. Изменение концентрации электронов отличается от теоретических расчетов: $\Delta N_{c \text{ теор}} = 2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ из-за некачественного зондового контакта между поверхностью ИТО и подпружиненным сферическим наконечником.

Глава 4 посвящена разработке и исследованию технологии изготовления электрооптического модулятора на основе оксида индия-олова на платформе из нитрида кремния. Разработан маршрут технологического процесса изготовления, состоящий из 24 планарных операций с использованием осаждений тонких пленок, термообработок, оптических и электронных литографий, жидкостного травления.

Разработаны и исследованы операции взрывной оптической литографии элементов ИТО с последующим отжигом. Экспериментально установлено, что площадь ИТО влияет на технологические режимы, необходимые для получения требуемого диапазона концентрации электронов из-за разницы влияния энергии и количества кислорода в процессах осаждения и отжига. Структуры ИТО, нанесенные электронно-лучевым испарением с ионным ассистированием, состоят из кристаллических зародышей, окруженных аморфными участками материала с повышенной концентрацией внедренного в объем кислорода. При последующем отжиге кристаллизация происходит по каналам диффузии внедренного кислорода к радиально растущим кристаллическим участкам. Температура отжига, при которой достигается кристаллизация и активация кислорода, тем ниже, чем больше энергия ионов при осаждении и площадь сверхстехиометрического кислорода вокруг кристаллических участков, определяемая площадью структуры и количеством кислорода в газовой смеси (Рисунок 7, а). Получены равномерные по площади кристаллические элементы ИТО с концентрацией электронов в диапазоне от $5 \cdot 10^{19}$ до $2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ при латеральных размерах структуры не менее 6 на 15 мкм.

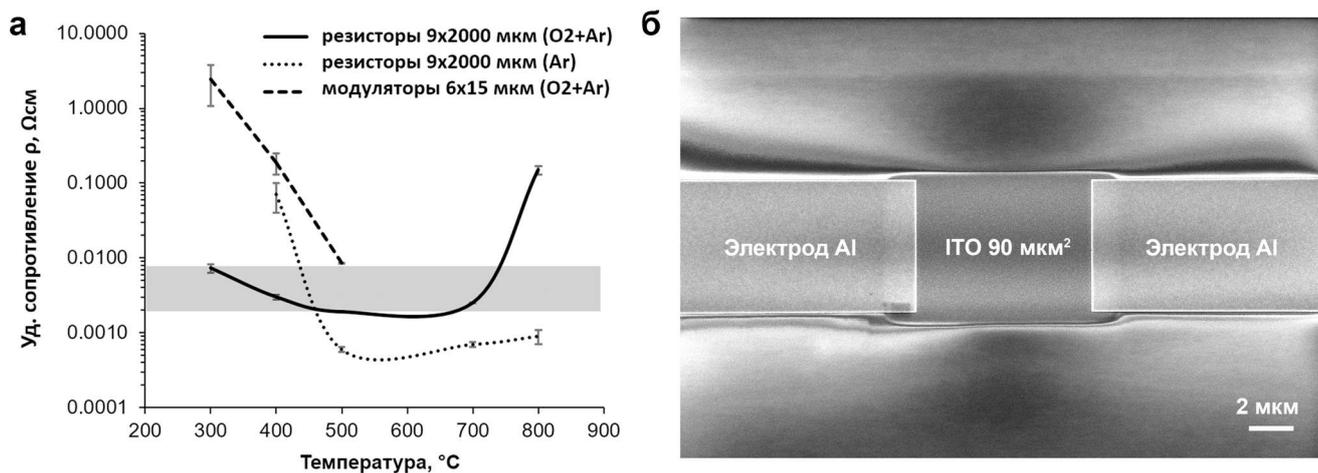


Рисунок 7. Тестирование элементов ИТО: а – зависимость удельного сопротивления от площади и параметров отжига; закрашенная область – требуемые значения; б – снимок СЭМ элемента ИТО

Разработана технология формирования диэлектрических структур модулятора. В качестве материала был выбран Al_2O_3 из-за его высокой диэлектрической постоянной, низкого поглощения, а также возможности выращивать конформные покрытия с высоким аспектным соотношением методом атомно-слоевого осаждения (АСО). Проведено сравнение влияния плазменного и термического АСО на характеристики ИТО. На микрометровых структурах ИТО дефектности не обнаружено при обоих методах, однако на миллиметровых площадях в процессе плазменного АСО на интерфейсе пленок возникают крупноразмерные впадины, тогда как термическое АСО разрушающего воздействия не оказывает. Удельное сопротивление резисторов и структур уменьшается примерно в 1,5 раза при обоих процессах АСО.

В результате анализа методов травления Al_2O_3 выбрано жидкостное травление в ряде растворов через маску фоторезистивного слоя. Исследованы зависимости скоростей травления от размера окон и температуры раствора, а также боковой подтрав под маску. Рассмотрены процесс с остановкой на слое Au, защищающем поверхность ИТО, и процесс с остановкой на поверхности ИТО. Показано что, изготовленные с помощью технологии ИВАЕ и последующего отжига, элементы ИТО устойчивы к ряду жидкостных травителей без защитных металлических слоев.

Исследована технология формирования металлического функционального слоя плазменной конструкции. Она состоит из процессов электронно-лучевой литографии, нанесения металлических пленок, и предусматривает возможность покрытия активного элемента слоем SiO_2 толщиной 2500 нм методом усиленного плазмой химического осаждения из газовой фазы, а также процессов литографии и травления контактных окон. На основе данной технологии изготовлены и протестированы электрические характеристики покрытых и непокрытых слоем SiO_2 активных элементов модулятора. Диэлектрическая проницаемость Al_2O_3 составила 8,3 при частоте 80 Гц, емкость МОП-конденсатора 495 фФ для активного элемента длиной 6,2 мкм, что соответствует теоретически рассчитанной (445 фФ). Осаждение SiO_2 и плазменное травление оказывают резкое влияние на удельное

сопротивление микрометровых структур ИТО и не оказывает влияния на резисторы миллиметровой длины, что требует дополнительного исследования процесса при использовании покрывающих слоев оксида (удельное сопротивление микрометровых структур выросло от 0,002 до более 0,05 Ом·см).

Для подтверждения требуемых параметров электрооптического модулятора был разработан ряд схем измерений с поляризационным контролем. Для измерения оптических потерь методом сокращения и статического коэффициента экстинкции используются лазерный диод с длиной волны 1550 нм, автоматический контроллер поляризации, поляриметр, фотодетектор, источник постоянного тока, подключенный посредством зондового контакта. Для измерения потерь методом обратной рефлектометрии используются лазерный диод, фотодетектор, обратный рефлектометр, переключатель оптического пути для возможности выравнивания волокна при вводе в тестируемое устройство. Для измерения СВЧ s-параметров задействованы лазерный диод 1550 нм, автоматический контроллер поляризации, поляриметр, высокочастотный фотодетектор, откалиброванный на фотодетектор векторный анализатор цепей и плата с импедансом 50 Ом для согласованной нагрузки на двухпортовую версию модулятора.

Для дальнейшего использования устройства вне лабораторных условий разработан процесс корпусирования интегрального оптического модулятора в корпус из алюминия, позволяющий располагать чип размером 10 на 10 мм на пьедестале, с посадочными местами под клейку волокон и местами под печатные платы для разварки электронной схемы, а также процесс выравнивания и клейки волокон в торец чипа для ввода света.

Электрооптический модулятор (Рисунок 8) был изготовлен по разработанному технологическому процессу и охарактеризован с помощью представленных схем измерения. Для ввода излучения в чип и зондового контакта использовалась прецизионная фотонная зондовая станция. Оптические потери, измеренные методом сокращения на волноводах с длинами от 1,5 до 4 см составили $2,4 \pm 0,22$ дБ/см в воздушной верхней оболочке и $0,5 \pm 0,09$ дБ/см в верхней оболочке SiO₂ в ТМ поляризации. Оптические потери, измеренные методом cut back на модуляторах с активным элементом длиной от 6,2 до 31 мкм в верхней оболочке SiO₂, расположенных на волноводах одинаковой длины, составили около 0,32 дБ/мкм в ТМ поляризации и 0,63 дБ/мкм в ТЕ поляризации.

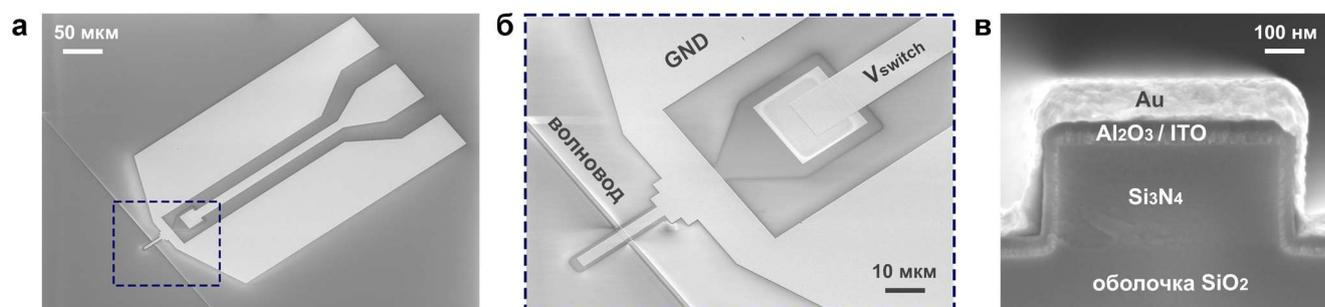


Рисунок 8. Снимки СЭМ изготовленного однопортового электрооптического модулятора: а – уменьшенное и б – увеличенное изображение; в – скол

Результаты измерения потерь на ввод, потерь волновода, потерь внутри плазмонного модулятора позволили рассчитать потери на сопряжение между волноводом и гибридным волноводом (активным элементом) и составили 1,15 дБ на один переход в ТМ поляризации и 5,15 дБ на один переход в ТЕ поляризации. Полные потери электрооптического модулятора в ТМ поляризации составили 4,22 дБ, что отличается от проектируемых (2,5 дБ) из-за неидеального интерфейса оптических слоев.

Отражения микроволн в СВЧ электродах были измерены, используя зонд конфигурации «Земля-Сигнал-Земля» с максимальной частотой 67 ГГц. Двухпортовая версия обладает отражениями менее -5 дБ во всем частотном диапазоне и менее -10 дБ в диапазоне от 5 до 20 ГГц. Однопортовая версия обладает высокими отражениями (более -5 дБ) во всем частотном диапазоне. Для работы с однопортовой версией необходима её дальнейшая оптимизация для конкретного применения с фиксированной частотой микроволны.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Создана классификация электрооптических модуляторов и представлен обзор наиболее перспективных решений. В результате анализа литературы установлено, что большинство перспективных реализаций требуют отдельной платформы не совместимой с КМОП технологией и с платформами, на которых строятся современные ФИС. Для квантовых, нейроморфных вычислений и для обеспечения плотной интеграции в схемах систем обработки данных требуются электрооптические модуляторы с полными потерями менее 1 дБ на длине волны 1550 нм, максимальным напряжением переключения сотни мВ, для всех применений требуется минимально возможная полоса пропускания единицы ГГц, а для систем обработки данных – 1 ТГц.

2. Проведен технологический анализ плазмонного электрооптического модулятора на основе оксида-индия олова, построенного на новой методике расчета, учитывающей поляризационно-зависимое сопряжение фотонной моды с активным элементом. В результате моделирования получены полные потери ТМ моды 2,5 дБ на длине волны 1550 нм при толщине волновода из нитрида кремния 300 нм в воздушной верхней оболочке. Рассчитан оптимальный диапазон концентрации электронов ИТО для электрооптических модуляторов, который составил от 0,5 до $2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$.

3. Для получения сверхгладких (среднеквадратическая шероховатость поверхности от 0,5 до 0,7 нм) пленок ИТО толщиной 20 нм с широким диапазоном концентрации носителей заряда (от 1 до $6 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$) рекомендуется использовать комбинацию осаждения тонких пленок ИТО методом электронно-лучевого испарения с ионным ассистированием и последующего отжига. Экспериментально продемонстрирован электрооптический эффект в полученных пленках с помощью эллипсометрии на отдельно спроектированном стенде. Значения электрооптической модуляции многослойных структур при $\lambda = 1550 \text{ нм}$ в диапазоне напряжений от +16 до -16 В соответствуют изменению концентрации электронов $\Delta N_c = 0,6 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, что отличается от теоретических расчетов: $\Delta N_{c \text{ теор}}$

$= 2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ из-за некачественного зондового контакта между поверхностью ИТО и подпружиненным сферическим наконечником и не учитываемого в расчетах падения плотности заряда вдали от зонда на площади 2 мм^2 по сравнению с рассчитываемой областью модулятора 25 мкм^2 .

4. Экспериментально установлено, что для обеспечения требуемого диапазона концентрации электронов в процессах осаждения и отжига из-за разницы влияния энергии и количества кислорода необходимо учитывать влияние площади структур оксида-индия олова на технологические режимы.

5. Экспериментально установлено, что для повышения воспроизводимости электрических характеристик пленок и структур оксида индия-олова необходимо учитывать влияние взаимного расположения образцов в вакуумной камере относительно источника испарения и источника ионов.

6. Разработан маршрут изготовления и измерены параметры плазмонного электрооптического модулятора на основе эффекта дисперсии свободных носителей заряда в оксиде индия-олова на платформе из нитрида кремния. Получены полные оптические потери $4,22 \text{ дБ}$ для модулятора длиной $6,2 \text{ мкм}$, из которых $2,30 \text{ дБ}$ – потери на сопряжение ТМ моды и плазмонного резонанса.

7. Разработана методика и проведены измерения потерь и СВЧ амплитудно-частотной характеристики плазмонного электрооптического модулятора с поляризационно-зависимым вводом излучения.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По теме работы опубликованы 15 научных трудов в научно-технических журналах, рецензируемых Web of Science и Scopus – 10; в журналах по перечню ВАК РФ – 2, общим объемом $12,94 \text{ п.л.}/2,77 \text{ п.л.}$:

1. *Разработка интегрального электрооптического модулятора на основе ИТО / Е.С. Лотков [и др.] // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества II Российская научная конференция: тезисы докладов. Омск. 2022. С. 229-230. (0,34 п.л./0,2 п.л.)* Соискателем проведен технологический анализ и разработан маршрут изготовления электрооптического модулятора.

2. *Оптические свойства сверхтонких пленок Pd и Pt на кварцевой подложке и на пленках триоксида вольфрама / Е.С. Лотков [и др.] // Журнал радиоэлектроники. 2023. № 12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.12.7> (дата обращения: 05.01.2024). (1,84 п.л./0,17 п.л.)* Соискателем разработан процесс осаждения оптических газочувствительных покрытий.

3. *Осаждение сверхтонких пленок в вакууме для изделий наноэлектроники / Е.С. Лотков [и др.] // Наноиндустрия. 2020. № 13. С. 132-138. (0,58 п.л./0,1 п.л.)* Соискателем разработан процесс осаждения тонких пленок оксида индия-олова.

4. *Осаждение сверхтонких пленок ИТО электронно-лучевым испарением для применений в интегрированной инфракрасной фотонике / Е.С. Лотков [и др.] // Восьмая международная конференция по фотонике и информационной оптике. 2019. С. 149-150. (0,23 п.л./0,18 п.л.)* Соискателем разработан процесс осаждения оксида индия-олова с электрооптическими свойствами.

5. *ITO film stack engineering for low-loss silicon optical modulators* / E.S. Lotkov [et al.] // *Scientific Reports*. 2022. T. 12. С. 6321. (1,27 п.л./0,64 п.л.) Соискателем разработан процесс осаждения оксида индия-олова и экспериментально измерен электрооптический эффект в полученных слоях.
6. *Low-loss silicon nitride photonic ICs for near-infrared wavelength bandwidth* / E.S. Lotkov [et al.] // *Optics Express*. 2023. T. 31. С. 16227-16242. (1,85 п.л./0,1 п.л.) Соискатель участвовал в разработке методики и проводил измерения полученных фотонных схем.
7. *Epitaxial Silver Films Morphology and Optical Properties Evolution over Two Years* / E.S. Lotkov [et al.] // *Coatings*. 2020. T. 10. С. 911 (1,5 п.л./0,45 п.л.) Соискатель участвовал в разработке процесса осаждения эпитаксиальных тонких пленок серебра и проводил анализ данных.
8. *The retrieval of a thin silver film dielectric constant by resonant approach* / E.S. Lotkov [et al.] // *Optics Communications*. 2020. T. 456. С. 124636. (0,58 п.л./0,05 п.л.) Соискатель участвовал в разработке процесса осаждения эпитаксиальных тонких пленок серебра.
9. *Evolutionary selection growth of silver films for low-loss nanophotonic devices* / E.S. Lotkov [et al.] // *Surfaces and Interfaces*. 2023. T. 39. С. 102897. (0,92 п.л./0,2 п.л.) Соискатель участвовал в разработке процесса осаждения эпитаксиальных тонких пленок серебра и проводил анализ данных.
10. *Optical spectroscopy of Ag/Py based magneto-plasmonic crystals* / E.S. Lotkov [et al.] // *International Conference Laser Optics (ICLO)*. Saint Petersburg. 2018. С. 425. (0,12 п.л./0,01 п.л.) Соискатель участвовал в разработке процесса осаждения эпитаксиальных тонких пленок серебра.
11. *Optical properties of tungsten trioxide, palladium, and platinum thin films for functional nanostructures engineering* / E.S. Lotkov [et al.] // *Optics Express*. 2020. T. 28. 32049-32060. (1,39 п.л./0,15 п.л.) Соискателем разработан процесс формирования оптических газочувствительных покрытий и структур.
12. *Optical hydrogen sensing with high-Q guided-mode resonance of Al₂O₃/WO₃/Pd nanostructure* / E.S. Lotkov [et al.] // *Scientific Reports*. 2023. T. 13. С. 890. (1,04 п.л./0,25 п.л.) Соискателем разработан процесс формирования оптических газочувствительных покрытий и структур.
13. *Deep multilevel wet etching of fused silica glass microstructures in BOE solution* / E.S. Lotkov [et al.] // *Scientific Reports*. 2023. T. 13. С. 5228. (1,04 п.л./0,25 п.л.) Соискателем разработан процесс отжига жестких масок для травления стекла.
14. *Tunable low-loss silicon nitride integrated circuits* / E.S. Lotkov [et al.] // *International Conference Laser Optics (ICLO)*. Saint Petersburg. 2022. С. 1-1. (0,12 п.л./0,01 п.л.) Соискатель участвовал в разработке методики и проводил измерения полученных фотонных схем.
15. *Ultrathin film deposition for nanoelectronic device manufacturing* / E.S. Lotkov [et al.] // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Krakow. 2020. T. 781, № 1, С. 012021. (0,12 п.л./0,01 п.л.) Соискателем разработан процесс осаждения тонких пленок оксида индия-олова.