

На правах рукописи



Толкач Никита Михайлович

**РАЗВИТИЕ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
ОПТИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМОГО ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ
НА ОСНОВЕ ТОНКОПЛЕНОЧНОЙ СТРУКТУРЫ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$**

Специальность 01.04.10 — Физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Рязань

2019

Работа выполнена на кафедре микро- и нанoeлектроники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» (ФГБОУ ВО «РГРТУ»), г. Рязань.

Научный руководитель: Вишняков Николай Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры микро- и нанoeлектроники ФГБОУ ВО «РГРТУ».

Официальные оппоненты: Тарасов Сергей Анатольевич, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой фотоники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Шелаев Артем Викторович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ООО «НТ-МДТ».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова Российской академии наук (ИОНХ РАН).

Защита состоится 27 июня 2019 г. в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.211.03 при ФГБОУ ВО «РГРТУ» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1, зал Ученого совета РГРТУ (<http://www.rsreu.ru/ru/contacts>).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «РГРТУ» по адресу <http://www.rsreu.ru/ru/post-graduate/dissertatsii>.

Автореферат разослан «___» _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.211.03,

к.ф.-м.н., доцент  Литвинов Владимир Георгиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Увеличение вычислительных мощностей приближается к пределу возможностей электронной техники и в ближайшем будущем станет возможным только за счет увеличения количества активных вычислительных элементов (транзисторов), что непременно создаст проблемы эффективного теплоотвода, роста энергопотребления и размеров, а также приведет к усложнению процесса изготовления и, как следствие, к удорожанию элементной базы. Именно поэтому актуальным на сегодняшний день является развитие альтернативных электронным вариантам вычислительных технологий. Одним из таких вариантов являются оптические технологии обработки информации.

Оптические технологии обладают рядом достоинств, из которых следует выделить следующие: распространение информации со скоростью близкой к скорости света; отсутствие у фотонов электрического заряда и способности влиять друг на друга, и, как следствие, высокая спектральная плотность и нечувствительность оптических сигналов к электромагнитным помехам; отсутствие распространения излучения за пределами оптического канала, что обеспечивает защищенность от перехвата информации; низкие энергопотери; отсутствие присущих электронике паразитных емкостей.

На данный момент времени применение оптических технологий хорошо развито для построения волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) и основанных на них активных и пассивных оптических сетей (англ. Active and Passive Optical Network – AON, PON). В ближайшем будущем принципы построения ВОСП могут лечь в основу компактных вычислительных устройств. Сейчас же ВОСП имеют достаточно крупные размеры и в большей степени подходят для передачи информации, нежели для ее обработки при коммутации оптических каналов.

Неотъемлемой частью ВОСП являются активные компоненты, выполняющие функции переключения – модуляторы, мультиплексоры, демультиплексоры (далее – оптические переключатели). Основными недостатками, применяемых в ВОСП оптических переключателей, являются их скорость переключения (от 1 мкс), габаритные размеры (от 5 мм), управляющие электромагнитные поля высокой интенсивности (от 1 ГВт/см²), а также двойное преобразование информации из оптических сигналов в электронные или наоборот. Поэтому актуальным на данный момент времени является создание оптических переключателей, в которых решены эти проблем.

Большое количество отечественных и зарубежных исследовательских работ посвящено изучению свойств халькогенидных стеклообразных полупроводниковых (ХСП) структур на основе системы соединений $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (аббревиатура – GST). Главной особенностью данных материалов является их способность находиться в двух устойчивых фазовых состояниях – кристаллическом и аморфном, изменять которые можно, например, низкоэнергетическими электромагнитными воздействиями. Структурное отличие аморфной и кристаллической фазы приводит к значительным различиям в оптических свойствах, что можно использовать на практике для бинаризации оптического сигнала.

Современные устройства, использующие материал GST, совмещают в себе быстроедействие, стабильность, энергоэффективность, устойчивость к помехам и

радиации. Их применение до настоящего времени ограничено областью электронных запоминающих устройств – твердотельной энергонезависимой памятью 3D XPoint (Intel, Micron, с 2015 г.), оптических – дисковых CD, DVD, BD накопителей информации. Область применения материала GST для оптических переключателей в системах ВОСП до сих пор недостаточно исследована и нуждается в совершенствовании физических моделей и разработке новых принципов управления оптическими сигналами.

Степень разработанности темы

На данном этапе развития технологий стоит отметить различные варианты оптических переключателей. Электрооптические переключатели на основе микроэлектромеханических систем (англ. Micro-Electro-Mechanical System – MEMS), жидких кристаллов на кремнии (англ. Liquid Crystal on Silicon – LCOS) имеют много входных и выходных портов для передачи данных, активно применяются в ВОСП с многочисленными перекрестными соединениями. Однако время переключения одного активного элемента в системах MEMS и LCOS составляет микросекунды, это ограничивает их применение для быстрой коммутации пакетов данных в ВОСП.

Оптические переключатели на основе нелинейной оптики, эффектов Керра, Погкельса, квантово-размерного эффекта Штарка имеют быстрое время переключения в диапазоне от наносекунд до пикосекунд. Существенными недостатками применения этих устройств в ВОСП являются их большие размеры (~ 5 мм) и управляющие электромагнитные поля высокой интенсивности (~ ГВт/см²), необходимые для выполнения переключения.

Оптически переключатели, не использующие электронные компоненты и управляемые только оптическими сигналами (далее – оптически управляемые переключатели) представляют особый интерес для областей применения, в которых требуется изолировать передаваемую ВОСП информацию от возможности прослушивания или влияния электромагнитных помех. Значительные перспективы для создания таких устройств имеет эффект фазового переключения и памяти в материале GST. Кроме того, переключение в материале GST происходит за время порядка 20 наносекунд при размере активной области в несколько микрометров и интенсивности электромагнитного поля порядка 100 мВт/мкм² = 10 МВт/см², что превосходит параметры описанных выше устройств.

Научные исследования эффекта фазового переключения и памяти в халькогенидных стеклообразных материалах ведутся с 1955 года. В 90-х годах данная тема получила развитие на фоне предложения использовать ХСП материалы GST в перезаписываемых оптических дисках. Новый импульс к исследованию этих материалов был дан в 2015 году с выходом коммерчески успешных твердотельных энергозависимых запоминающих устройств 3D XPoint. На текущий момент времени большое количество исследовательских работ посвящено применению материала GST в качестве активного элемента оптически управляемых переключателей для ВОСП.

Существующие физические модели оптически управляемых переключателей на основе тонкопленочных структур GST, опираются на изменение пропускательной и отражательной способностей активного материала в результате модификации его фазового состояния под воздействием кратковременных интенсивных лазерных импульсов, но не учитывают ряд оптических эффектов, способных улучшить или

ухудшить работу этих устройств. Так, например, при пропускании либо отражении электромагнитных волн в тонкой пленке часть их из-за интерференции поглощается, отражается и пропускается в разных соотношениях, что приводит к высоким потерям. В устройствах обработки и передачи данных высокие потери сигнала являются наиболее вероятной причиной искажения информации, их низкой энергоэффективности.

Цель и задачи

Цель данной работы – развитие физической модели оптически управляемого переключателя на основе тонкопленочной структуры с изменяемым фазовым состоянием материала $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, позволяющее сформировать рекомендации для достижения необходимых оптических параметров тонкопленочной структуры.

Для решения данной цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Анализ современного состояния проблемы оптически управляемых переключателей по данным патентных источников и научных статей.
2. Разработка физико-математической модели оптически управляемого переключателя на основе тонкопленочной структуры $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, учитывающая эффекты фазового переключения и интерференции электромагнитных волн.
3. Разработка требований к структуре оптически управляемого переключателя с размерами активной области не более 2 мкм, скоростью переключения не более 1 пс, интенсивностью управляющего оптического излучения не более $1 \text{ Вт/мкм}^2 = 0,1 \text{ ГВт/см}^2$, потерь информационного сигнала не более 50 %.
4. Разработка алгоритма для оптимизации параметров тонкопленочной структуры $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (показатель преломления, коэффициент экстинкции, толщина слоя, длины волн и углы распространения оптических сигналов) для достижения необходимых оптических параметров (отражательная и пропускательная способности).
5. Разработка методики исследования параметров тонкопленочной структуры $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, позволяющей оценить достоверность результатов, получаемых с помощью разработанной физико-математической модели оптически управляемого переключателя на основе тонкопленочной структуры $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$.
6. Сравнение модельных и экспериментальных результатов исследования параметров тонкопленочной структуры $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$.

Предмет и объект исследования

Объектом исследования являются наноразмерные тонкопленочные структуры на основе соединения $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$.

Предметом исследования являются эффекты фазового переключения и интерференции электромагнитных волн, индуцированные оптическим воздействием, и связанные с ними изменения оптических свойств (пропускательной и отражательной способностей) объекта исследования.

Методология и методы исследования

Для исследования оптических свойств тонкопленочных структур в работе использовались методы оптической фотометрии, спектрофотометрии, микроскопии, эллипсометрии, спектроскопии, в том числе метод спектроскопии комбинационного

рассеяния света. Для изучения морфологических параметров поверхности использовались методы атомно-силовой микроскопии.

Для моделирования распространения оптического излучения в тонкопленочных структурах использовались методы расчета геометрической и волновой оптики. С помощью закона Снелла рассчитывались углы преломления оптического излучения. Формулы Френеля и соотношения Эйри использовались для расчета отражательной и пропускательной способностей. На основе модели Френеля-Эйри для многослойных сред рассчитывались комплексные показатели преломления тонкопленочных структур.

Для обработки экспериментальных и теоретических данных использовались методы нелинейной регрессии, численные методы градиентного спуска, методы минимизации и нелинейной оптимизации функций.

Научная новизна полученных результатов

1. Усовершенствована физико-математическая модель оптически управляемого переключателя на основе тонкопленочной структуры $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$. Учтены эффект изменения фазового состояния материала $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ и условия максимума и минимума пропускательной и отражательной способностей пленки $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ в аморфном и кристаллическом состояниях при интерференции электромагнитных волн. Благодаря этому потери информационного оптического сигнала в тонкопленочной структуре $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ составили не более 46 %.
2. Предложена методика коррекции траектории температурного дрейфа для достижения необходимой локальности при измерении комплексного показателя преломления тонкопленочной структуры с фазовыми переходами. Методика основана на учете влияния температуры на траекторию перемещения перетяжки воздействующего лазерного излучения относительно исследуемой области.
3. Разработана методика локального измерения в области с диаметром от 350 до 900 нм комплексного показателя преломления тонкопленочной структуры с фазовыми переходами. Методика основана на использовании фотометрических данных об отражательной и пропускательной способностях ограниченной диаметром перетяжки лазерного пучка области пленки при ее фазовых превращениях.
4. Установлено экспериментально значение энергетической экспозиции 3,2 нДж/мкм² управляющего излучения с длиной волны 403 нм, при котором наблюдается изменение фазового состояния с кристаллического на аморфное материала пленки $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ толщиной 22 нм, не приводящее к ее разрушению.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Разработанную физико-математическую модель оптически управляемого переключателя на основе тонкопленочной структуры $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ целесообразно использовать при формировании рекомендаций для достижения необходимых оптических параметров тонкопленочных структур оптически управляемых переключателей.
2. Разработанную методику коррекции траектории температурного дрейфа целесообразно использовать в технике сканирующей зондовой микроскопии для термостабилизации исследуемой области.

3. Разработанный метод локального измерения комплексного показателя преломления тонкопленочной структуры с фазовыми переходами целесообразно использовать для контроля параметров (толщина слоя, комплексный показатель преломления) оптических устройств в процессе их производства.
4. Разработанный макет для проведения локальных исследований оптических параметров тонкопленочной структуры целесообразно использовать для измерения пропускательной и отражательной способностей тонкопленочной структуры в диапазоне длин волн от 400 нм до 1700 нм при облучении оптическими источниками излучения, в частности лазерными источниками излучения с длительностью импульса от 10 нс до 1 мс и потреблением электрической мощности до 500 мВт.

Научные результаты и положения, выносимые на защиту

1. Усовершенствованная физико-математическая модель оптически управляемого переключателя на основе тонкопленочной структуры $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$. Модель учитывает эффекты фазового переключения и интерференции электромагнитных волн и позволяет уменьшить в тонкопленочной структуре $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ потери информационного оптического сигнала с 74 % до 46 %.
2. Методика коррекции траектории температурного дрейфа, вызванного колебаниями температуры измерительной установки и исследуемого образца. Методика позволяет стабилизировать положение перетяжки лазерного излучения в локальной области исследуемого образца и уменьшить температурный дрейф с 500 нм до 50 нм при локальных измерениях оптических параметров тонкопленочных структур.
3. Теоретически и экспериментально установленное значение энергетической экспозиции $3,2 \text{ нДж/мкм}^2$ управляющего импульса лазерного излучения с длиной волны 403 нм и длительностью 10 нс. При этом значении наблюдается изменение фазового состояния с кристаллического на аморфное материала пленки $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ толщиной 22 нм в структуре стекло Corning Glass 1737F – пленка $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, не приводящее к разрушению пленки.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов исследования обеспечена использованием современного высокоточного научного оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования РГРТУ, лаборатории химии координационных полиядерных соединений Института общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, лабораторий Института перспективных материалов и технологий НИУ МИЭТ, применением известных аналитических методов исследования (атомно-силовой микроскопии, спектроскопии комбинационного рассеяния света, спектрофотометрии, оптической микроскопии и спектроскопии) и численных математических (метод градиентного спуска, методы минимизации и нелинейной оптимизации функций, метод нелинейной регрессии) методов.

Результаты исследования обсуждались на всероссийских и международных конференциях и опубликованы в рецензируемых научных изданиях.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Диссертация содержит результаты экспериментальных и теоретических исследований эффектов фазового переключения и интерференции электромагнитных волн в тонких пленках GST, индуцированных оптическим воздействием, и связанных с ним изменений в распространении оптического излучения. Уделено внимание изучению условий минимальной и максимальной пропускательной и отражательной способностей в результате интерференции электромагнитных волн в аморфных и кристаллических пленках GST.

Приведены физические модели, результаты моделирования и оптимизации параметров оптически управляемого переключателя на основе тонкопленочной структуры GST. Для подтверждения теоретических выводов проведены экспериментальные исследования тонкопленочных структур GST в аморфном и кристаллическом состояниях. Результаты, полученные в работе, раскрывают особенности оптических эффектов, происходящих в полупроводниковых материалах с фазовыми переходами, что может быть использовано при разработке оптически управляемых переключателей.

Личный вклад автора

Автор диссертации принимал участие в постановке экспериментов и их проведении, обработке и интерпретации экспериментальных результатов, создании теоретических моделей, написании научных статей в составе авторского коллектива и подготовке их к публикации, представлял доклады по теме диссертации на конференциях. Результаты, выносимые на защиту и составляющие научную новизну диссертационной работы, получены автором лично.

Апробация и реализация результатов диссертации

Основные результаты работы представлялись на следующих конференциях: VI форум проектов союзного государства – VI форум вузов инженерно-технологического профиля (2017, Минск), 7-я, 8-я, 9-я и 10-я всероссийские школы-семинары студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Диагностика наноматериалов и наноструктур» (2014, 2015, 2017, 2018, Рязань), 5-я и 6-я средиземноморские конференции по встраиваемым вычислительным ресурсам «Mediterranean Embedded Computing Resources» (2016, 2017, Черногория), I и II международные научно-технические и научно-методические конференции «Современные технологии в науке и образовании» (2016, 2017, Рязань), международная научно-практическая конференция «Интеллектуальный и научный потенциал XXI века» (2016, Казань), международная научно-практическая конференция «Современные проблемы и перспективные направления инновационного развития науки» (2016, Екатеринбург), 9-я, 10-я и 11-я международные конференции «Аморфные и микрокристаллические полупроводники» (2014, 2016, 2018, Санкт-Петербург), международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов» (2016, Москва), 3-я научно-техническая конференция «Наука настоящего и будущего» (2015, Санкт-Петербург), XXVIII международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях» (2015, Рязань).

Результаты работы использованы при выполнении НИР в рамках: гранта УМНИК № 5837ГУ/2015, стипендии Президента РФ молодым ученым и аспирантам № СП-1724.2015.5, государственных контрактов с Минобрнауки РФ №14.513.11.0138, №16.522.11.7033, №16.552.11.7086 и №14.B37.21.1102.

Полученные в диссертации теоретические и практические результаты реализованы в виде программного продукта, имеющего 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Публикации

Основные научные результаты диссертации опубликованы в 25 научных работах, включая 4 публикации в изданиях, рекомендуемых ВАК, 2 публикации в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus, 18 публикаций в материалах всероссийских и международных конференций и 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дается общая характеристика работы, обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи, научная новизна и выносимые на защиту положения, определены теоретическая ценность и практическая значимость результатов работы.

Первая глава содержит описание современных технологий построения оптических переключателей, применяемых в волоконно-оптических системах передачи (ВОСП).

Преимущество  Недостаток		Цена изготовления	Интегрируемость	Миниатюрность	Скорость обработки информации	Скорость передачи информации	Плотность мультиплексирования	Энергопотребление	Защита от перехвата информации	Помехозащищенность	Радиоактивная стойкость материалов	Стабильность материалов
Микро- и наноэлектроника	Электронные компоненты											
	Intel 3D Xpoint											
	Оптоэлектронные компоненты											
Фотоника	Нелинейная фотоника											
	Кремниевая фотоника											
	GST											

Рисунок 1 – Сравнение технологий оптически управляемых устройств. В клетках таблицы штрихами показаны: точками – преимущества, диагональными линиями – недостатки, отсутствие штрихов – нейтральная позиция между данными состояниями

Рассмотрены физические модели оптических переключателей, в частности, модель оптически управляемого переключателя на основе материала GST. Показаны преимущества и недостатки существующих физических моделей и обоснован выбор материала GST (рисунок 1).

Определено направление развития физической модели оптически управляемого переключателя на основе тонкопленочной структуры GST, состоящее в учете интерференции электромагнитных волн и изменений фазового состояния материала GST пленки при кратковременных низкоэнергетических воздействиях оптического излучения.

Вторая глава посвящена разработке физико-математической модели оптически управляемого переключателя на основе тонкопленочной структуры GST, учитывающей эффекты фазового переключения и интерференции электромагнитных волн.

Отражательная и пропускательная способности тонкопленочной структуры, учитывающие процессы многократного переотражения электромагнитных волн в пленке и их последующей интерференции, определяются в соответствии с соотношениями Эйри:

$$\mathfrak{R} = \left| \frac{r_{12} + r_{23} e^{i\beta}}{1 + r_{12} r_{23} e^{i\beta}} \right|^2, \quad (1)$$

$$\mathfrak{T} = \left| \frac{t_{12} t_{23} e^{i\beta/2}}{1 + r_{12} r_{23} e^{i\beta}} \right|^2. \quad (2)$$

где r_{12} , r_{23} – коэффициенты отражения Френеля на границе раздела сред; t_{12} , t_{23} – коэффициенты пропускания Френеля на границе раздела сред; индексами указаны граница раздела и порядок следования сред: «12» – из среды 1 в среду 2, «23» – из среды 2 в среду 3; β – фазовый сдвиг электромагнитной волны ($\beta = 4\pi\hat{n}_2 h \cos(\varphi_2)/\lambda$); \hat{n}_2 – комплексный показатель преломления среды 2 ($\hat{n}_2 = n_2 + ik_2$); k_2 – коэффициент экстинкции среды 2; h – толщина слоя 2; λ – длина волны в вакууме; φ_1 и φ_2 , φ_3 – угол падения и углы преломления.

Коэффициенты Френеля определяются из следующих соотношений:

$$\begin{aligned} r_{12}^{\parallel} &= \frac{\hat{n}_2 \cos(\varphi_1) - n_1 \cos(\varphi_2)}{\hat{n}_2 \cos(\varphi_1) + n_1 \cos(\varphi_2)}, & r_{12}^{\perp} &= \frac{n_1 \cos(\varphi_1) - \hat{n}_2 \cos(\varphi_2)}{n_1 \cos(\varphi_1) + \hat{n}_2 \cos(\varphi_2)}, \\ r_{23}^{\parallel} &= \frac{n_3 \cos(\varphi_2) - \hat{n}_2 \cos(\varphi_3)}{n_3 \cos(\varphi_2) + \hat{n}_2 \cos(\varphi_3)}, & r_{23}^{\perp} &= \frac{\hat{n}_2 \cos(\varphi_2) - n_3 \cos(\varphi_3)}{\hat{n}_2 \cos(\varphi_2) + n_3 \cos(\varphi_3)}, \\ t_{12}^{\parallel} &= 1 - r_{12}^{\parallel}, & t_{12}^{\perp} &= 1 - r_{12}^{\perp}, & t_{23}^{\parallel} &= 1 - r_{23}^{\parallel}, & t_{23}^{\perp} &= 1 - r_{23}^{\perp}. \end{aligned} \quad (3)$$

здесь n_1 , n_3 – показатели преломления сред 1, 3; указаны обозначениями: \perp – нормальная составляющая поляризации излучения (TE), для которой вектор напряженности электрического поля электромагнитной волны перпендикулярен плоскости падения (\perp плоскости, в которой лежат падающий и отраженный лучи); \parallel тангенциальная составляющая поляризации излучения (TM), для которой вектор напряженности электрического поля электромагнитной волны лежит в плоскости падения.

В тонкопленочной структуре GST оптически управляемого переключателя распространяются два оптических сигнала – управляющий и информационный (рисунок 2). Фазовое состояние материала пленки GST контролируют импульсы управляющего сигнала с длительностью τ_0 , τ_1 и длиной волны излучения λ_{ctrl} . В зависимости от фазового состояния материала пленки меняются ее пропускательная и отражательная способности для информационного сигнала с длиной волны излучения λ_{inf} . Таким образом оптически управляемый переключатель работает в 2 режимах – пропускание информационного сигнала либо его отражение.

Для достижения необходимых оптических параметров тонкоплёночной структуры оптически управляемого переключателя были введены два критерия: 1) для информационного сигнала с длиной волны λ_{inf} необходимо, чтобы при аморфном состоянии пленки GST отражательная способность \mathfrak{R}_a была минимальна, а пропускательная способность \mathfrak{T}_a максимальна, для пленки GST в кристаллическом состоянии, наоборот, т.е. \mathfrak{R}_c максимальна, а \mathfrak{T}_c минимальна; 2) для управляющего сигнала с длиной волны λ_{ctrl} необходимо, чтобы пленка GST имела максимальные поглощательные способности A_a и A_c пленки как в аморфном так и в кристаллическом состояниях. Математическое описание критериев показано с помощью следующих систем уравнений:

$$\forall \lambda = \lambda_{inf} : \begin{cases} \mathfrak{R}_a = \min \\ \mathfrak{T}_a = \max \\ \mathfrak{R}_c = \max \\ \mathfrak{T}_c = \min \end{cases}, \quad (4) \quad \forall \lambda = \lambda_{ctrl} : \begin{cases} A_a = 1 - \mathfrak{R}_a - \mathfrak{T}_a = \max \\ A_c = 1 - \mathfrak{R}_c - \mathfrak{T}_c = \max \end{cases}. \quad (5)$$

При моделировании рассматривался вариант нормального падения волны ($\varphi_i=0$), благодаря которому был введен ряд упрощений, не учитывались поляризация излучения (т.к. при нормальном падении зависимости \mathfrak{R} для ТЕ и ТМ поляризации равны друг другу, аналогично и для \mathfrak{T}), углы $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ (т.к. их косинусы равны единицам). При этом отражательная \mathfrak{R} и пропускательная \mathfrak{T} способности зависят от толщины пленки h и длины волны λ . Показатели преломления n_1, n_3 , комплексный показатель преломления n_2 зависят от длины волны λ и имеют постоянные значения.

Ввиду сложности аналитического решения систем уравнений (4) и (5) нахождение параметров оптически управляемого переключателя выполнялось численным методом оптимизации нелинейных систем. С помощью данного метода были рассчитаны целевые функции, соответствующие критериям (4) и (5):

$$F_{inf}(\lambda, h) = \mathfrak{R}_a(\lambda, h)^2 + (1 - \mathfrak{T}_a(\lambda, h))^2 + (1 - \mathfrak{R}_c(\lambda, h))^2 + \mathfrak{T}_c(\lambda, h)^2, \quad (6)$$

$$F_{ctrl}(\lambda, h) = (\mathfrak{R}_a(\lambda, h) + \mathfrak{T}_a(\lambda, h))^2 + (\mathfrak{R}_c(\lambda, h) + \mathfrak{T}_c(\lambda, h))^2. \quad (7)$$

Значения минимумов целевых функций соответствуют ближайшим значениям λ и h , удовлетворяющим критериям (4) и (5).

При разработке структуры оптически управляемого переключателя (рисунок 3) предполагалось, что пленка GST расположена в перетяжках пучков – d_0 лазерных излучений управляющего и информационного сигналов. Это необходимо для концентрации максимальных интенсивностей лазерных излучений в пленке, уменьшения площади активной области и создания условий прямого волнового фронта, при котором все оптические лучи падают под одним углом.

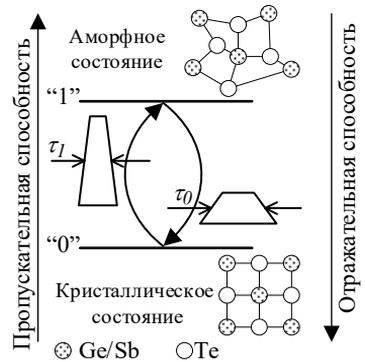


Рисунок 2 – Иллюстрация свойств GST при изменении фазового состояния

На рисунках 4, 5 показано положение минимальных значений целевой функции $F_{inf}(\lambda, h)$ при различных значениях λ и h . Зависимости отражательных и пропускательных способностей пленки GST от толщины пленки показаны на рисунке 6. При увеличении длины волны λ целевая функция $F_{inf}(\lambda, h)$ убывает. Для исследований использовалось значение длины волны информационного оптического сигнала 1550 нм. Это связано с тем, что, во-первых, именно такая длина волны используется в волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС) из-за минимальных потерь (отсутствует поглощение на молекулах водяного пара), во-вторых, оптоволоконна, легированные ионами эрбия, хорошо усиливают оптические сигналы с длиной волны 1550 нм.

При длине волны 1550 нм функция $F_{inf}(\lambda, h)$ принимает минимальное значение при толщине пленки $h = 202$ нм. Однако стоит обратить внимание на то, что чем меньше толщина пленки, тем меньше количество оптической мощности будет ею поглощено, а также необходимо для изменения ее фазового состояния. Поэтому рационально использовать толщину пленки GST $h = 24$ нм, соответствующую локальному минимуму целевой функции (см. рисунки 4, 5).

Аналогичный анализ был проведен для целевой функции $F_{crit}(\lambda, h)$. При уменьшении длины волны до 400 нм целевая функция $F_{crit}(\lambda, h)$ убывает. Распространённые марки лазерных источников оптического излучения используют длину волны 403 нм, поэтому для формирования управляющих сигналов оптически управляемого переключателя было выбрано это значение. Значение толщины пленки 24 нм, выбранное ранее при анализе функции $F_{inf}(\lambda, h)$, соответствует области минимальных значений целевой функции $F_{crit}(\lambda, h)$. Поэтому при дальнейших исследованиях использовалось это значение.

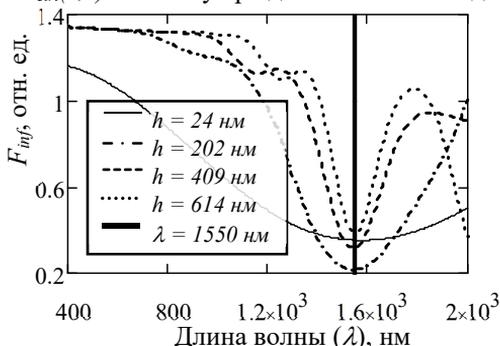


Рисунок 4 – Положения минимумов целевой функции $F_{inf}(\lambda, h)$ при различных значениях толщины пленки h

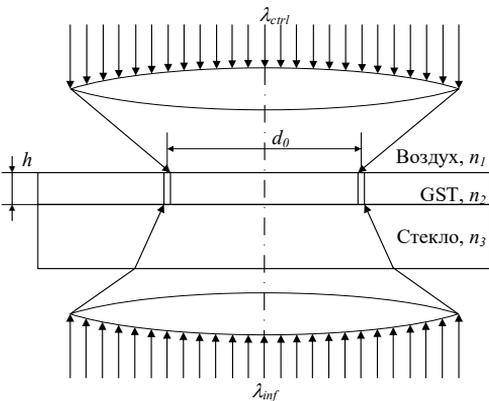


Рисунок 3 – Структура оптически управляемого переключателя

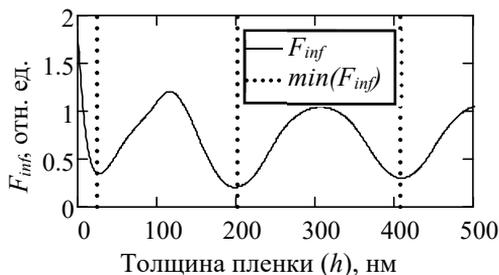


Рисунок 5 – Положения минимумов целевой функции $F_{inf}(\lambda, h)$ при значении длины волны $\lambda = 1550$ нм

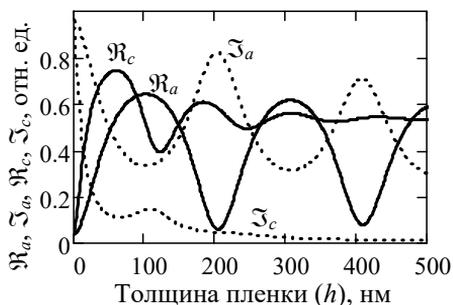


Рисунок 6 – Отражательные R_a , R_c и пропускательные T_a , T_c способности пленки GST в аморфном и кристаллическом состояниях, соответственно, при $\lambda = 1550$ нм

Таким образом, в результате применения разработанной физико-математической модели оптически управляемого переключателя на основе тонкопленочной структуры «воздух – пленка GST – подложка SiO₂» для достижения необходимых оптических параметров тонкопленочной структуры, удовлетворяющих критериям (4) и (5), определены оптимальные значения толщины слоя пленки GST – 24±5 нм (5 нм – технологический допуск на толщину пленки, шероховатость подложки), длин волн информационного – 1550 нм и управляющего – 403 нм излучений. Оптические потери информационного сигнала, связанные с интерференцией, при этом снизились с 74 % до 44 %. Значения всех переменных и

постоянных величин, используемые при моделировании, указаны в таблице 1.

Третья глава содержит описание методов экспериментальных исследований оптических и морфологических свойств наноразмерных тонкопленочных структур GST.

Разработан макет измерительного комплекса для локального исследования процесса обратимого изменения фазового состояния в тонкопленочной структуре GST. Макет включает систему оптически и электрически связанных компонентов, показанных на рисунке 7.

С помощью зондовой нанолaborатории «Ntegra Spectra» осуществлялось перемещение исследуемого образца и совмещение пучков лазерных излучений 403 и 1550 нм в локальной области пленки GST образца, а также выполнялись измерения методами спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) и атомно-силовой микроскопии (АСМ). Минимальный размер локальной области ограничивался диаметром перетяжки лазерного излучения и составлял 350 и 900 нм для излучений с длинами волн соответственно 403 и 1550 нм.

На базе данного макета была разработана методика локального измерения комплексного показателя преломления тонкопленочной структуры с фазовыми переходами. С помощью фотодиодов осуществлялось измерение уровней интенсивностей прошедшего через локальную область пленки GST и отраженного от нее излучения. По этим данным рассчитывались значения отражательной и пропускательной способностей. Далее проводился расчет комплексного показателя преломления. Для этого была использована следующая целевая функция:

$$F(R_e, T_e, n_2, k_2) = 4 \left(\frac{R_e - R(n_2, k_2)}{R_e + R(n_2, k_2)} \right)^2 + 4 \left(\frac{T_e - T(n_2, k_2)}{T_e + T(n_2, k_2)} \right)^2, \quad (8)$$

здесь R_e , T_e – экспериментальные данные об отражательной и пропускательной способностях; $R(n_2, k_2)$, $T(n_2, k_2)$ – значения отражательной и пропускательной способностей, рассчитанные с помощью выражений (1) – (2), для переменных значений n_2 , k_2 и постоянных значений λ , h , n_1 , n_3 .

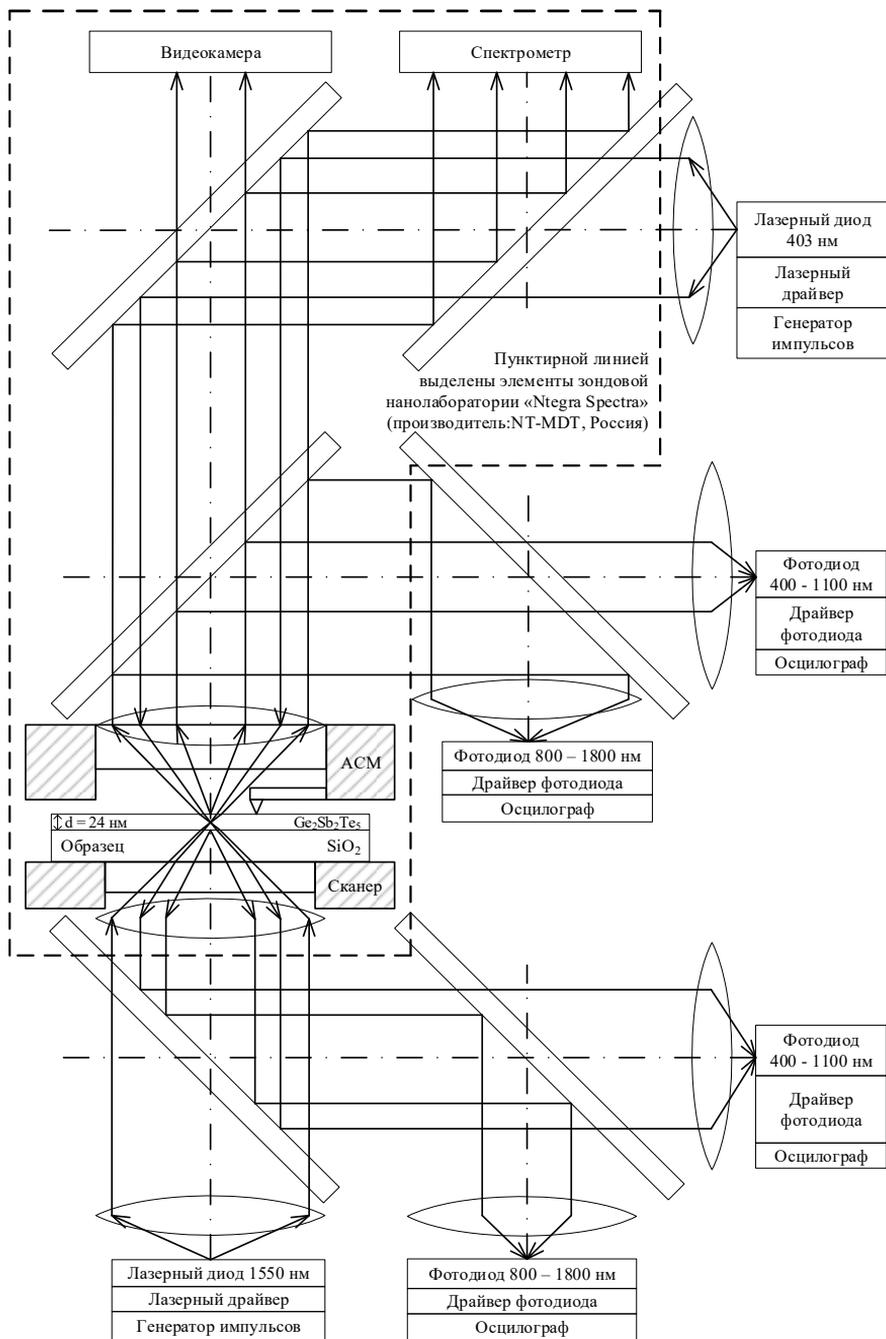


Рисунок 7 – Схема макета установки для диагностики обратимого изменения фазового состояния тонкопленочной структуры GST

Глобальный минимум целевой функции $F(\mathcal{R}_e, \mathcal{I}_e, n_2, k_2)$ соответствовал значению комплексного показателя преломления \hat{n}_2 ($\hat{n}_2 = n_2 + i \cdot k_2$). Ориентировочное положение минимума контролировалось по результатам эллипсометрии, полученным для исследуемого материала GST. Эта информация также позволяла определить фазовые состояния материала.

В процессе разработки макета измерительного комплекса, при совмещении пучков информационного и управляющего лазеров в исследуемой области тонкопленочной структуры была обнаружена проблема, связанная с их нестабильным положением в пространстве из-за температурного дрейфа (далее – термодрейфа). В результате исследований было установлено, что данная нестабильность вызвана температурным нагревом исследуемой области и элементов измерительного макета, их термическим расширением. Для описания процесса термодрейфа во времени и в пространстве была установлена следующая зависимость:

$$\Delta L(t) = A(1 - e^{-t/\tau}), \quad (9)$$

здесь τ – время, характеризующее скорость дрейфа; A – максимальная величина термодрейфа установки.

Для коррекции термодрейфа была использована техника атомно-силовой микроскопии (далее – АСМ). Зонд АСМ размещался рядом с лазерным пятном, наводимым на исследуемую область образца. Перед проведением необходимых измерений термодрейф отслеживался с помощью АСМ и вносились поправки в положение исследуемого образца.

Для определения параметров термодрейфа с помощью АСМ изображений использовалась следующая система уравнений:

$$\begin{cases} x_0 = x_1 + \Delta n_x - \Delta L_x + \Delta L_x \cdot \exp\left(-\frac{t_s}{\tau_x} \cdot \frac{2n \cdot y_0 + x_0}{2n^2 - n - 1}\right) \\ y_0 = y_1 + \Delta n_y - \Delta L_y + \Delta L_y \cdot \exp\left(-\frac{t_s}{\tau_y} \cdot \frac{2n \cdot y_0 + x_0}{2n^2 - n - 1}\right) \end{cases}, \quad (10)$$

здесь x_0, y_0 – координаты пикселя исходного изображения; x_1, y_1 – координаты пикселя искаженного изображения; n – количество пикселей в строке или столбце изображения; t_s – предполагаемое время сканирования в секундах; Δn_x и Δn_y – дрейф установки на момент окончания сканирования; ΔL_x и ΔL_y – дрейф установки в пикселях по осям x и y ; τ_x и τ_y – время, характеризующее скорость дрейфа по осям x и y в секундах. В итоге с помощью определенных параметров термодрейфа выполнялось внесение поправки в положение исследуемого образца.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований образцов тонкопленочных структур GST, изготовленных в соответствии с параметрами, полученными при выполненном в главе 2 моделировании.

Методом магнетронного распыления были изготовлены образцы аморфных пленок GST с различной толщиной (погрешность ± 5 нм): 1) 24 нм; 2) 130 нм; 3) 130 нм; 4) 202 нм; 5) 409 нм; 6) 614 нм; 7) 15 нм; 8) 15 нм. Образцы с № 3 и 8 подвергались отжигу для кристаллизации пленок. Для образцов № 1 – 6 в качестве подложек использовались оптические стекла Corning 1737F. Для образцов № 7, 8 использовались

Si подложки. Толщина пленок № 1, 4 – 6 соответствовала рассчитанным в главе 2 минимумам целевых функций F_{inf} и F_{ctrl} при $\lambda_{inf} = 1550$ нм и $\lambda_{ctrl} = 403$ нм.

Методом АСМ проведен контроль толщины пленок GST образцов с № 1 – 6. Получены следующие значения толщины (погрешность ± 2 нм): 1) 22 нм; 2) 128 нм; 3) 126 нм; 4) 205 нм; 5) 409 нм; 6) 611 нм.

Для контроля комплексного показателя преломления материала GST для образцов с аморфной № 7 и кристаллической № 8 пленками проведены соответствующие измерения методом эллипсометрии в диапазоне длин волн от 200 до 2600 нм.

Для отработки описанного в главе 3 метода расчета комплексного показателя преломления для образцов с аморфной № 2 и кристаллической № 3 пленками GST методом спектрофотометрии проведены измерения спектров пропускания и отражения в диапазоне длин волн от 200 до 2600 нм. По полученным данным рассчитаны значения комплексного показателя преломления (см. рисунок 8), которые имеют хорошую сходимость с результатами эллипсометрии (отличались в интервале 5 %).

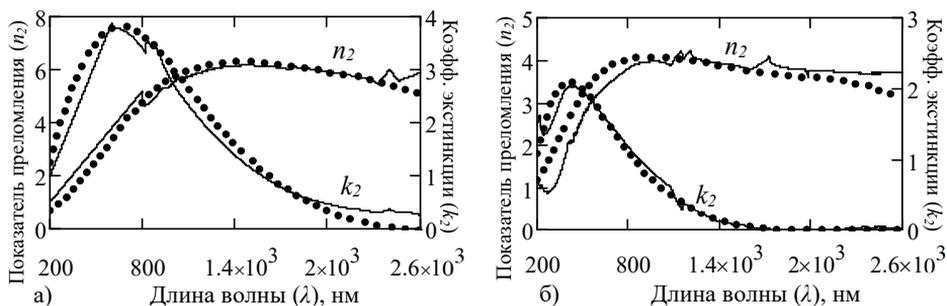


Рисунок 8 – Спектральные зависимости n_2 и k_2 для пленки GST в различных фазовых состояниях: а) кристаллическом, б) аморфном. На рисунке указаны: сплошными линиями – результаты моделирования; точками – результаты эллипсометрии

С помощью описанного в главе 3 макета проведены исследования процесса обратимого изменения фазового состояния локальных областей тонкопленочной структуры GST. В результате исследования влияния лазерного излучения 403 нм с различными длительностью τ (от 10 нс до 1 мкс), периодом следования T (от 20 нс до 1 мкс) и энергетической экспозицией (от 0,02 нДж/мкм² до 20 нДж/мкм²) подобраны режимы, при которых происходят обратимые изменения фазового состояния материала пленки GST из аморфного состояния в кристаллическое (кристаллизация) и обратно из кристаллического в аморфное (аморфизация).

Для контроля фазового состояния материала GST в локальных областях пленки измерены спектры комбинационного рассеяния света (рисунок 9). Установлено, что после кристаллизации состояние области пленки (спектр 2) соответствует кристаллической фазе с кубической структурой, а после аморфизации состояние области пленки соответствует аморфной фазе (спектр 3).

В процессе проведения экспериментов установлена проблема, связанная с температурным дрейфом (термодрейфом) исследуемой области, вызванным колебаниями температуры. Влияние температурного дрейфа проявлялось следующим образом: 1) дрейф

лазерного пятна по исследуемой поверхности, сбор спектрального сигнала с участков пленки с разными фазовыми состояниями; 2) расфокусировка оптической схемы, уширение диаметра лазерного пятна и уменьшение интенсивности излучения в середине пятна. В итоге полученный спектр 1 (рисунок 9) был связан с комбинацией разных фазовых состояний пленки GST.

С помощью описанного во 2 главе метода для коррекции траектории температурного дрейфа удалось уменьшить термодрейф с 500 до 50 нм, что позволило добиться необходимой локальности измерений, улучшения качества получаемых спектральных зависимостей (рисунок 6, спектры 2 и 3).

С помощью описанного в 3 главе макета также проведены экспериментальные исследования отражательной и пропускательной способностей, комплексного показателя преломления локальной области пленки GST при изменении ее фазового состояния. Экспериментальные результаты показаны в таблице 1. При сравнении этих результатов с полученными во 2 главе модельными результатами максимальная разница составила 13,5%, что связано с шероховатостью подложки, погрешностью скорости роста пленки, неравномерным распределением фазового состояния материала по диаметру исследуемой области пленки, а также с тем, что при фокусировке лазерный пучок в поперечном сечении имеет распределение мощности излучения, подчиняющееся функции Гаусса. В целом, порядки значений отражательной и пропускательной способностей экспериментальных и модельных результатов соответствуют друг другу и находятся в пределах технологического допуска ± 5 нм для толщины пленки $h = 24$ нм, из чего сделан вывод о достаточном уровне достоверности разработанной модели.

Таким образом, итогом проделанных исследований стала физическая модель оптически управляемого переключателя на основе тонкопленочной структуры GST с изменяемым фазовым состоянием материала, позволяющая сформировать рекомендации для достижения необходимых оптических параметров тонкопленочной структуры, а именно ее отражательной, пропускательной и поглощательной способностей, минимальных потерь оптического сигнала в ней (таблица 1).

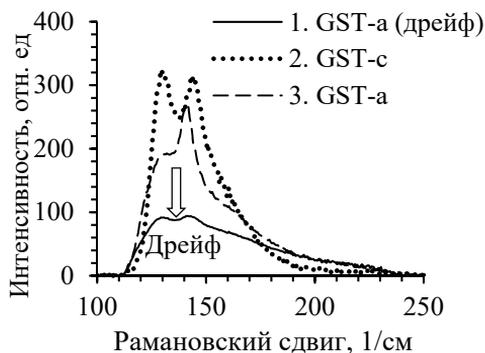


Рисунок 9 – Спектры КРС локальной области пленки GST: а) в аморфном состоянии, подверженное дрейфу; б) в кристаллическом состоянии; в) в аморфном состоянии

Таблица 1 – Параметры оптически управляемого переключателя на основе тонкопленочной структуры GST

Параметр	Значения			
1. Излучение лазеров				
Длина волны: λ , нм	403		1550	
Поляризация	TE, TM		TE, TM	
Угол падения: φ_1 , градусы $^\circ$	0 $^\circ$		0 $^\circ$	
2. Излучение необходимое для изменения фазового состояния пленки				
Мощность: P_0 , мВт	20	67,5	-	
Размер перетяжки пучка лазерного излучения: d_0 , нм	350		-	
Длительность импульса: τ , нс	30	10	-	
Период импульса: T , нс	200		-	
Энергетическая экспозиция, H_0 , нДж/мкм ²	2,82±0,03	3,17±0,03	-	
3. Параметры структуры				
Показатель преломления окружающей среды (воздух): n_1	1		1	
Показатель преломления подложки Corning Glass 1737F: n_3	1,52		1,5	
Толщина пленки GST (метод АСМ): h , нм	22±2			
Состояние пленки GST (метод КРС)	Аморф.	Крист.	Аморф.	Крист.
Комплексный показатель преломления материала пленки GST (эллипсометрия): \hat{n}_2	2,1+2,4i	1,7+3i	3,8+0,03i	6,3+1,2i
3.1. Экспериментальные результаты				
Отражательная способность: \mathcal{R}_e , %	35,2±2	54,1±2,3	16,6±1,7	53,9±2,6
Пропускательная способность: \mathcal{T}_e , %	18,1±1,5	10,2±1,7	71,2±2,7	23,4±2
Поглощательная способность: A_e , %	46,7±1,2	35,7±1	12,2±0,4	22,7±0,7
Потери оптического сигнала: α , %	53,3±1,2	64,3±1	28,8±2,7	46,1±2,6
Комплексный показатель преломления: \hat{n}_2	2,3+2,1i	1,7+3,3i	3,6+0,4i	6,7+1,5i
3.2. Модельные результаты (с учетом технологического допуска для толщины пленки ±5 нм)				
Толщина пленки GST: h , нм	24±5			
Отражательная способность: \mathcal{R} , %	42±3	53±4	22±6	56±7
Пропускательная способность: \mathcal{T} , %	14±4	10±4	76±6	25±6
Поглощательная способность: A , %	44±2	39±0,5	2±0,2	20±1
Потери оптического сигнала: α , %	56±2	61±0,5	24±6	44±7
4. Максимальная разница модельных и экспериментальных результатов				
max($\mathcal{R}_e - \mathcal{R}$, $\mathcal{T}_e - \mathcal{T}$, $A_e - A$), %	11,8	7,4	13,5	11,7

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Изучены различные модели оптически управляемых переключателей, применяемых в волоконно-оптических системах передачи, и выбрана модель на эффекте изменения фазового состояния в тонкопленочной структуре GST. При анализе этой модели были определены направления ее развития, состоящие в применении эффектов интерференции электромагнитных волн, полного внутреннего отражения для осуществления оптического управления и уменьшения оптических потерь в тонкопленочной структуре GST.
2. Разработана новая физико-математическая модель оптически управляемого переключателя, учитывающая эффекты фазового переключения и интерференции электромагнитных волн. Модель позволила провести оптимизацию параметров оптически управляемого переключателя и уменьшить оптические потери с 74 % до 46 %, вызванные интерференцией.
3. Предложен новый метод для расчета комплексного показателя преломления материала пленки по данным о ее отражательной и пропускательной способностях. Метод показал хорошую достоверность результатов исследования комплексного показателя преломления при сравнении с методом эллисометрии. Погрешность метода составила 5 %.
4. Для испытания тестовой структуры оптически управляемого переключателя с оптимизированными в результате моделирования параметрами разработан макет измерительного комплекса на базе зондовой нанолaborатории «Ntegra Spectra». Данный макет позволил в пределах области с диаметром, соизмеримым с размером перетяжки пучка используемого лазерного излучения (от 350 до 900 нм), получить спектры оптического излучения, рассеянного тонкопленочной структурой, оценить ее пропускательную и отражательную способности для излучения с длинами волн 1550 нм и 403 нм при воздействии наносекундных импульсов лазерного излучения с длиной волны 403 нм.
5. При макетировании измерительного комплекса была обнаружена проблема температурного дрейфа исследуемой области. Для устранения проблемы разработана методика, позволяющая учесть искажения, вызванные температурным дрейфом, рассчитать его траекторию и выполнить коррекцию положения исследуемой области с уменьшением дрейфа с 500 нм до 50 нм.
6. С помощью разработанного макета и методики локального измерения комплексного показателя преломления тонкопленочной структуры с фазовыми переходами в локальной области с диаметром от 350 до 900 нм обнаружено изменение фазового состояния пленки из аморфного в кристаллическое, что также подтверждается результатами исследования фазового состояния пленки методом комбинационного рассеяния света.
7. С помощью разработанного макета было проведено исследование оптических параметров тонкопленочной структуры оптически управляемого переключателя при аморфном и кристаллическом состояниях пленки GST: отражательной, пропускательной и поглощательной способностей, комплексного показателя преломления для излучений с длинами волн 403 и 1550 нм. Полученные результаты отличались в пределах 13,5% от результатов моделирования. Проведенные исследования позволили уменьшить оптические потери

информационного оптического сигнала, вызванные интерференцией электромагнитных волн в тонкопленочной структуре GST, с 74 до 46 % и сформулировать рекомендации для создания оптически управляемых тонкопленочных переключателей с малыми оптическими потерями. Также определены временные и энергетические характеристики лазерного излучения 403 нм, позволяющие выполнять обратимое изменение фазового состояния тонкопленочной структуры GST при переходе из аморфного в кристаллическое состояние (кристаллизация) $\tau_{a \rightarrow c} = 30$ нс, $T_{a \rightarrow c} = 200$ нс, $H_{0a \rightarrow c} = 3,2$ нДж/мкм², из кристаллического в аморфное (аморфизация) $\tau_{c \rightarrow a} = 10$ нс, $T_{c \rightarrow a} = 200$ нс, $H_{0c \rightarrow a} = 2,8$ нДж/мкм²).

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные научные результаты диссертационного исследования опубликованы:

– В журналах, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования:

1. Tolkach N., Vishnyakov N., Vorobyov Y., Avachev A., Rybina N. Optical computing device architecture based on Ge₂Sb₂Te₅ // 6th Mediterranean Conference on Embedded, Computing – MECO 2017. Bar. Montenegro. 2017. Pp. 67-69.
2. Tolkach N.M., Vishnyakov N.V., Vorobyov Y.V., Maslov A.D. Modeling of the Drift of Atomic-Force Microscope Probe for Local Chemical Nanodiagnosics // 5th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO'2016). Bar. 2016. Pp. 87-89.

– В журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, по группе научных специальностей 01.04.00 – физика:

3. Вишняков Н.В., Толкач Н.М., Провоторов П.С., Оптимизация параметров тонкопленочной структуры на основе Ge₂Sb₂Te₅ для оптических переключателей // Вестник РГРТУ. Рязань. 2018. С. 2-8.
4. Трегулов В.В., Скопцова Г.Н., Балаганский С.С., Толкач Н.М. Исследование особенностей поверхности пленки CdS, изготовленной гидрохимическим осаждением на текстурированной кремниевой подложке // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Физико-математические и технические науки. 2014. № 10. С. 91-96.
5. Воробьев Ю.В., Вишняков Н.В., Гудзев В. В., Толкач Н.М., Трегулов В.В. Структура поверхности пленок пористого кремния, сформированных в электролите на основе HF с добавкой KMnO₄ // Нано - и микросистемная техника. 2014. № 11. С. 16-19.
6. Трегулов В.В., Афонин М.В., Воробьев Ю.В., Толкач Н.М. Особенности свойств пленок пористого кремния, сформированных на текстурированной подложке // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2013. № 4-1 (46). С. 103-107.

– В материалах международных конференций:

7. Толкач Н.М., Вишняков Н.В., Маслов А.Д., Провоторов П.С. Метод расчета комплексного показателя преломления тонких пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ // Сборник трудов международной конференции «Аморфные и микрокристаллические полупроводники». Санкт-Петербург. 2018. С. 128-129.
8. Толкач Н.М., Вишняков Н.В. Методы построения оптических вычислительных устройств на основе материала $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ // Сборник трудов II Международной научно-технической и научно- методической конференции «Современные технологии в науке и образовании». Рязань. 2017. Т. 4. С. 212-217.
9. Толкач Н.М. Применение халькогенидных стеклообразных полупроводниковых наноструктур для построения оптических вычислительных устройств // Труды IX Всероссийской школы - семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению “Диагностика наноматериалов и наноструктур”. Рязань. 2017. Т. 2. С. 144-150.
10. Толкач Н.М., Вишняков Н.В., Провоторов П.С. Энергоэффективные оптические вычислительные устройства на основе халькогенидных-полупроводниковых структур // Сборник материалов форума проектов программ союзного государства – VI форум вузов инженерно-технологического профиля. Республика Беларусь, г. Минск. 2017.
11. Вишняков Н.В., Воробьев Ю.В., Вихров С.П., Толкач Н.М., Козюхин С.А. Влияние висмута на параметры оптической записи в структурах на основе тонких пленок $(\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5)_{100-x}\text{Vix}$ // Сборник статей международной научной конференции «Аморфные и микрокристаллические полупроводники». 2016. С. 136-137.
12. Вихров С.П., Авачев А.П., Вишняков Н.В., Толкач Н.М., Анкудинов А.В., Мальцев М.В. Исследование различий фазовых состояний пленки $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ в области воздействия лазерного луча // Аморфные и микрокристаллические полупроводники. Сборник трудов IX Международной конференции. СПб. 2014. С. 255-256.
13. Вихров С.П., Авачев А. П., Вишняков Н.В., Толкач Н.М., Мальцев М. В. Исследование фазового состояния пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ методом комбинационного рассеяния света // Аморфные и микрокристаллические полупроводники. Сборник трудов IX Международной конференции. СПб. 2014. С. 245-246.
14. Воробьев Ю.В., Вишняков Н.В., Маслов А.Д., Толкач Н.М. Применение метода комбинационного рассеяния света для исследования фазовых переходов в пленках структуры Ge - Sb - Te // Сборник материалов конференции: III научно техническая конференция с международным участием "Наука настоящего и будущего" для студентов, аспирантов и молодых ученых. СПб. 2015. С. 236-237.
15. Толкач Н.М. Дрейф зонда атомно силового микроскопа при реализации TERS эффекта // XXIII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам "Ломоносов 2016". Секция "Физика". Сборник тезисов. Москва. 2016. Т. 2. С. 153-154.
16. Толкач Н.М., Вишняков Н.В. Влияние температуры на резонансную частоту кантилевера атомно силового микроскопа // Интеллектуальный и научный потенциал XXI века: сборник статей Международной научно- практической конференции. Казань. 2016. Т. 4. С. 165-169.

17. Толкач Н.М., Вишняков Н.В. Метод спиралевидного сканирования для зондовой микроскопии // Интеллектуальный и научный потенциал XXI века: сборник статей Международной научно- практической конференции. Казань. 2016. Т. 4. С. 199-202.
 18. Толкач Н.М., Вишняков Н.В. Метод для коррекции траектории перемещения зонда сканирующего зондового микроскопа с учетом влияния термодрейфа // Труды международной научной конференции «Современные проблемы и перспективные направления инновационного развития науки. Екатеринбург. 2016. С. 185-189.
 19. Толкач Н.М., Вишняков Н.В. Моделирование дрейфа зонда атомно - силового микроскопа для локальной химической нанодиагностики // Труды XXVIII Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях». Рязань. 2015. Т. 10. С. 253-259.
 20. Толкач Н.М., Вишняков Н.В. Коррекция СЗМ изображений с учетом термодрейфа // Инновации в науке, производстве и образовании. Сборник трудов Международной научно - практической конференции. Рязань. 2013. С. 66-69.
- В материалах всероссийских конференций:
21. Толкач Н.М., Вишняков Н.В., Маслов А.Д., Провоторов П.С. Модель распространения света в тонкопленочной структуре $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ на прозрачной подложке // Труды X Всероссийской школы - семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению “Диагностика наноматериалов и наноструктур”. Рязань. 2018. Т. 3. С. 39-44.
 22. Толкач Н.М., Мальцев М.В. Исследование фазовых переходов в пленках халькогенидов $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ методом комбинационного рассеяния света // Труды VII Всероссийской школы семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению “Диагностика наноматериалов и наноструктур”. Рязань. 2014. С.194-196.
 23. Воробьев Ю.В., Рыбин Н.Б., Маслов А.Д., Толкач Н.М. Компенсация дрейфа зонда атомно - силового микроскопа // Труды VIII Всероссийской школы семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению “Диагностика наноматериалов и наноструктур”. Рязань. 2015. Т. 3. С. 207-210.
 24. Воробьев Ю.В., Рыбин Н.Б., Толкач Н.М. Повышение точности методов атомно силовой микроскопии // Труды VII Всероссийской школы семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению “Диагностика наноматериалов и наноструктур”. Рязань. 2014. С. 39-42.
- В материалах, подтверждающих результаты интеллектуальной деятельности:
25. Толкач Н.М., Вишняков Н.В., Воробьев Ю.В., Рыбин Н.Б. Программа для коррекции перемещения зонда сканирующего зондового микроскопа с учетом искажений, вызванных термодрейфом, свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015663675, 03.11.2015.

Толкач Никита Михайлович

**РАЗВИТИЕ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
ОПТИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМОГО ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ
НА ОСНОВЕ ТОНКОПЛЕНОЧНОЙ СТРУКТУРЫ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать 25.04.2019 г. Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,5.

Тираж 100 экз.

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина.

390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.