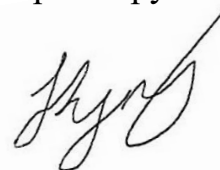


На правах рукописи



Купцов Алексей Дмитриевич

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА УМЕНЬШЕНИЯ
МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ОКСИДНЫХ
ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ В ВАКУУМЕ

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва – 2026

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

Научный руководитель:

Сидорова Светлана Владимировна,
кандидат технических наук

Официальные оппоненты:

Ли Илларион Павлович,
доктор технических наук,
советник генерального директора по развитию и
инновациям,
ООО «ОКБ «Плутон»

Сушенцов Николай Иванович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры конструирования и производства
радиоэлектронной аппаратуры,
ФГБОУ ВО «Поволжский государственный
технологический университет»

Ведущая организация:

**АО «Научно-производственное предприятие
«Пульсар»,
г. Москва**

Защита диссертации состоится «__» _____ 2026 г. в 14:30 час. на заседании диссертационного совета 24.2.331.16 в Московском государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5 стр. 1.

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

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

Автореферат разослан «__» _____ 2026 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 диссертационной работы:

Диэлектрические покрытия являются средой распространения оптических сигналов для видимого и ближнего инфракрасного диапазонов излучения в изделиях оптики, фотоники и микроэлектроники. Оптические волноводные структуры изготавливаются из материалов, обеспечивающих эффект полного внутреннего отражения волны за счет различия между коэффициентами преломления среды распространения и ограничивающих ее областей.

Для оптики и фотоники перспективными материалами являются тонкопленочные оксидные покрытия с толщинами отдельных слоев от 50 до 1000 нм. Разнообразие спектральных характеристик различных материалов (коэффициентов преломления, отражения и пропускания, поглощения) в широком диапазоне длин волн позволяет разрабатывать и формировать структуры для оптических волноводов, преобразователей и фильтров.

Тонкопленочные покрытия формируют одиночными и чередующимися слоями, материалы которых имеют высокий и низкий показатели преломления, для достижения эффективного показателя преломления и возможности управления интерференционными эффектами.

Из-за разных типов решетки, размеров, коэффициента термического расширения, поверхностного натяжения и других параметров тонкопленочные структуры, сформированные на подложке, подвержены влиянию остаточных механических напряжений (ОМН). Стремление системы «пленка-подложка» к равновесному состоянию приводит к деструкции покрытий и нивелированию ОМН, что является причиной снижения работоспособности и потери надежности изделия.

С середины XIX в. исследователями представлены аналитические и численные методы оценки механических напряжений (Stoney G.G., Тимошенко С.П., Klokholm E., Klein C.A.). В исследованиях Шугурова А.Р., Минкина А.М., Бурякова А.М. описаны механизмы и закономерности роста ОМН в системе «пленка-подложка» при разной структуре тонкопленочного покрытия. Николаев И.В., Грубый С.В. исследовали эффект квазипластичности хрупких материалов для обеспечения атомарной шероховатости. Панфилов Ю.В., Одинокое В.В., Нестеров С.Б., Слепцов В.В., Сидорова С.В. обосновали необходимость и показали возможность модернизации вакуумного оборудования с технологическими источниками для производства материалов и приборов электронной техники. Коллективы авторов Finegan J.D., Thad V.Jr., Mei Liu, Дюжев Н.А. и Гусев Е.Э. продемонстрировали оптические методы интегральной оценки и исследовательское оборудование для расчета ОМН в системе «пленка-подложка». В работах Daniel R, Егорова Г.П., Бабушкина А.С. показана возможность воздействия ионно-плазменными методами на величину ОМН в системе «пленка металла-подложка».

Таким образом, использование технологических решений на основе результатов экспериментов и расчетов позволяет влиять на уровень ОМН в системе

«пленка-подложка», где одним из ключевых параметров можно выделить шероховатость подложки.

Однако на настоящий момент не решена проблема ОМН в системе «пленка-подложка» для оксидных покрытий, в т.ч. многослойных, сформированных на подложках с учетом ее шероховатости.

Поэтому **целью** работы является снижение остаточных механических напряжений в системе «пленка оксида-подложка» влиянием на шероховатость подложки ионной обработкой при условии сохранения функциональных оптических свойств покрытий.

Для достижения поставленной цели необходимо решить **задачи**:

1. Составить классификацию факторов возникновения остаточных механических напряжений в системе «пленка-подложка».
2. Выполнить физико-математическое моделирование функциональных параметров и остаточных механических напряжений в системе «пленка оксида-подложка».
3. Модернизировать технологический узел источника ионов для обеспечения возможности равномерной обработки подложек диаметром до 100 мм.
4. Экспериментально оценить влияние технологических режимов ионной обработки подложек и формирования оксидных тонкопленочных покрытий на их функциональные и механические свойства.
5. Разработать и провести апробацию методики формирования оксидных многослойных покрытий с малыми значениями остаточных механических напряжений.

Научная новизна:

1. Установлена связь шероховатости подложки и остаточных механических напряжений в системе «пленка оксида-подложка» путем физико-математического моделирования для определения адгезионной прочности тонкопленочных покрытий толщиной от 100 до 1000 нм.
2. Показана зависимость остаточных механических напряжений в системе «пленка-подложка» для покрытий толщиной от 100 до 1000 нм при силе отслаивания покрытия от подложки от 10 до 50 Н.
3. Установлена связь вида неплоскостности кремниевой подложки и остаточных механических напряжений в покрытиях Al_2O_3 толщинами от 150 до 615 нм.

Практическая значимость:

1. Разработанная физико-математическая модель системы «пленка оксида-подложка» показала, что шероховатость подложки от 2 до 5 нм обеспечивает высокую адгезию покрытия Al_2O_3 к подложке Si при толщине покрытия от 100 до 350 нм для сжимающих остаточных механических напряжений от 121 до 1748 МПа при силе отслаивания покрытия от подложки 20 Н.
2. Созданная система наклона малогабаритного ионного источника позволяет проводить процесс ионной обработки подложек диаметром до 100 мм с

углом наклона 15° , обеспечивая более чем в 4 раза бóльшую площадь обработки, чем площадь самого источника.

3. Разработанная методика с предварительной ионной обработкой подложки в течение 2 мин позволяет формировать однослойные и многослойные покрытия с малыми значениями остаточных механических напряжений и высокой адгезией к подложке и между слоями соответственно, сохраняя функциональные характеристики покрытий.

Степень достоверности полученных результатов:

Достоверность диссертационной работы подтверждена результатами самостоятельно проведенных экспериментальных исследований, согласованных с результатами теоретического анализа, применением апробированных общепринятых теоретических и экспериментальных методик измерения величин остаточных механических напряжений, последующей статистической обработкой полученных данных, использованием современных измерительных приборов и программ, непротиворечивостью полученных результатов мировым достижениям.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Минимальными остаточными механическими напряжениями обладает система «пленка-подложка» на основе Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 за счет ионной обработки подложки с параметром решетки более 0,3 нм, шероховатости менее 12 нм и последующего формирования покрытия.

2. Полученная физико-математическая модель для расчета механических напряжений в тонкопленочных оксидных структурах толщиной от 100 до 1000 нм учитывает влияние шероховатости до 10 нм в условиях силы отслаивания покрытия от подложки до 50 Н.

3. Разработанная система наклона источника ионов до 15° с дискретностью 5° позволяет обрабатывать подложки до 100 мм при диаметре ионного пучка 25 мм с равномерностью более 90 % и реализовать способ ионной обработки подложки и тонкопленочных покрытий.

4. Вид неплоскостности подложки определяет величину остаточных механических напряжений в системе «пленка-подложка» ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Si}$) при разных толщинах покрытий: для 150 нм выпуклость снижает напряжения на 65 %, тогда как для 615 нм вогнутость обеспечивает их уменьшение на 21 %.

5. Ионная обработка поверхности покрытия Al_2O_3 при энергии (371 ± 31) эВ и плотности тока менее 208 А/м^2 в течение 2 мин уменьшает разброс остаточных механических напряжений в 2,8 раза для толщины 150 нм и уровень в 1,9 раза для 615 нм.

Апробация работы:

Основные положения диссертационной работы докладывались на:

- международном симпозиуме «Актуальные проблемы функциональных материалов», Ставрополь, 2025;
- международной научно-практической конференции XI «Наука настоящего и будущего», Санкт-Петербург, 2023;

- международной научно-технической конференции XV «Наукоемкие технологии в машиностроении», Москва, 2023;
- международной молодежной конференции по радиоэлектронике, электротехнике и энергетике 5 и 6 «International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering», Москва, 2023–2024;
- международной научно-технической конференции 17–19 «Вакуумная техника, материалы и технология», Москва, 2023–2025;
- международной научно-технической конференции студентов и аспирантов XXX–XXXI, XXXIII «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», Москва, 2023–2024, 2026;
- международной научно-технической конференции «International Russian Automation Conference (RusAutoCon)», Сочи, 2025;
- международной конференции XXVII «Взаимодействие ионов с поверхностью», Рязань, 2025;
- конференции с международным участием 11 «International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures», Санкт-Петербург, 2024;
- всероссийской конференции с международным участием молодых ученых и специалистов XV–XVIII «Будущее машиностроения России», Москва, 2022–2025;
- всероссийской научно-технической конференции с международным участием 31 и 32 «Вакуумная техника и технологии», Санкт-Петербург, 2024–2025;
- научно-технической конференции с международным участием специалистов 29 и 30 «Вакуумная наука и техника», Судак, 2022, Махачкала, 2023;
- всероссийской конференции XII–XIV «Необратимые процессы в природе и технике», Москва, 2023–2025;
- всероссийской научно-технической конференции «Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии», Москва, 2023, 2025–2026;
- всероссийской молодежной конференции III «Перспективные материалы и высокоэффективные процессы обработки», Саратов, 2024;
- российской студенческой научно-технической конференции 10 и 11 «Вакуумная техника и технология», Казань, 2023–2024.

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на заседаниях и научных семинарах кафедры электронных технологий в машиностроении МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2022–2026.

Разработанные технологии и оборудование представлялись на всероссийской молодежной научно-инженерной выставке XVII–XX «Политехника», Москва, 2022–2025.

Подана заявка на изобретение: RU 2025 114 197 А (от 27.05.2025) «Система отклонения ионного пучка источника ионов».

Внедрение результатов:

1. Разработанная методика получения многослойных тонкопленочных покрытий $\text{TiO}_2\text{--SiO}_2$ с малыми значениями остаточных механических напряжений передана и внедрена в ПАО «ПНППК», г. Пермь.
2. Разработанная методика вакуумного осаждения оксидных защитных тонкопленочных структур Al_2O_3 и SiO_2 на подложки из кварцевого стекла с чувствительным элементом из золота передана и внедрена в АО «Этна», г. Москва.

Методы исследования:

Для решения поставленных задач применялись законы геометрической оптики (закон Снеллиуса), компьютерное моделирование на основе дифференциальных уравнений Максвелла, методы теории упругости. Численное моделирование осуществлялось с помощью метода конечных элементов, позволяющего проводить расчеты напряженности электрического поля оптического волновода и напряженно-деформированного состояния системы «пленка-подложка» в статической постановке. Функциональные и механические характеристики покрытий изучались методами спектрального анализа (рамановская и рентгенфлуоресцентная спектроскопия) с использованием рентгеновского, видимого и ИК-излучения. Применялись аналитические методы статистического и сравнительного анализов, планирования эксперимента.

Публикации:

По результатам и основному содержанию диссертации опубликовано 44 научные работы в журналах и трудах конференций общим объемом 14,6 п.л., из них 8 работ в рецензируемых изданиях из перечня ВАК РФ (5,8 п.л.) и 4 – в научно-технических журналах, индексируемых базами данных WoS и Scopus (1,3 п.л.).

Личный вклад:

Автором проведен литературный обзор и классифицированы факторы возникновения механических напряжений в системе «пленка-подложка». Выполнено компьютерное моделирование с целью оценки оптических и механических характеристик оксидных покрытий. Разработана физико-математическая модель для оценки механических напряжений, возникающих при разной шероховатости подложки и разрушении адгезионной прочности. Описана роль зонных моделей в анализе механических напряжений покрытий. Измерена шероховатость поверхностей и адгезионную прочность покрытий к подложке. На основе экспериментальных данных оценены скорости осаждения и травления покрытий, их равномерность по толщине и параметры ионной обработки подложки, а также рассчитана энергия ионов аргона. Оценен вклад расхода газа и давления в камере в изменение скорости осаждения и коэффициента отражения покрытий. Проведены экспериментальные исследования зависимости механических напряжений от параметров подложки, покрытий и последующей их обработки. Разработана и апробирована на многослойных оксидных покрытиях методику формирования структур с низким уровнем механических напряжений.

Показано, что ионная обработка оксидных покрытий не оказывает влияния на их коэффициент пропускания. Все результаты и выводы получены лично соискателем.

Структура и объем работы:

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, основных результатов и выводов, заключения, списка литературы и приложения. Материалы диссертации изложены на 173 страницах, содержащих 140 рисунков, 13 таблиц, 41 формулу, список литературы из 143 наименований и приложения на 54 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цель и задачи, сформулированы научная новизна и практическая значимость, изложены положения, выносимые на защиту.

В Главе 1 проведен анализ на основе литературного обзора и патентного поиска типов напряженного состояния в системе «пленка-подложка». Выделены типы дефектов покрытий, возникающих в результате релаксации ОМН.

Рассмотрены факторы и параметры, влияние которых вносит существенный вклад в уровень напряженного состояния системы «пленка-подложка»: толщина покрытия, температура подложки в процессе роста покрытия, состояние рабочей технологической среды в вакуумной камере, адгезия покрытия к подложке. Составлена классификация факторов возникновения напряженного состояния системы «пленка-подложка». Классификация содержит 11 групп, учитывающих природу возникновения механических напряжений тонкопленочного покрытия, сформированного на подложке. Тип роста структур, наличие дислокаций, термические и внешние воздействующие факторы системы являются первостепенными параметрами, требующими контроля и управления при формировании структур с малыми механическими напряжениями.

Составлена классификация основных методов оценки механических напряжений системы «пленка-подложка»: дифракционные, оптические, акустические и методы спектроскопии, определения кривизны подложки, и наноиндентирование. Рациональным методом оценки ОМН выбран подход, основанный на определении радиуса кривизны круглой планарной подложки и балочной структуры, закрепленной с одной стороны. Измерения проводились на оптическом профилометре WYKO NT9300 (Veeco Instruments Inc., США).

На основании литературного обзора составлен перечень основных функциональных материалов толщиной 50–1000 нм для приборов оптической и электронной техники для диапазона рабочих длин волн 10–1800 нм (Рисунок 1).

Для однослойных оптических систем чаще всего применяются Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 покрытия, а для многослойных структур – чередование TiO_2 – SiO_2 слоев.

В результате проведенного анализа доказана актуальность применения тонкопленочных покрытий для оптики и фотоники. Для данных областей выделены наиболее используемые тонкопленочные планарные структуры оптической интегральной схемы – волноводы.

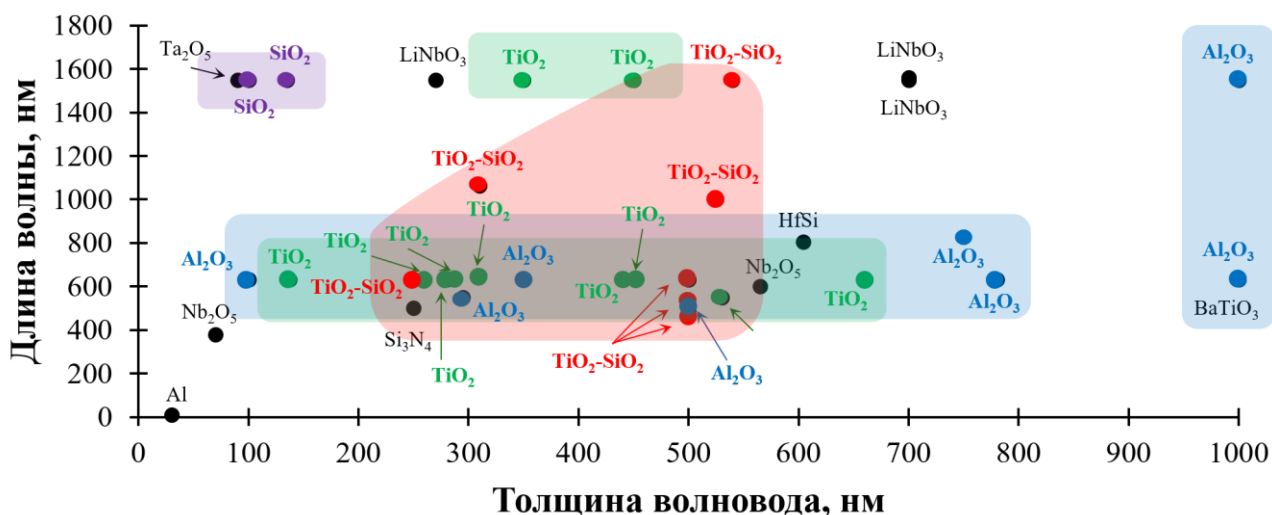


Рисунок 1. Функциональные материалы приборов оптической и электронной техники

Проведен литературный обзор материалов подложек (кремний (Si), кварцевое стекло (КС), ниобат лития), функциональных слоев (проводники и диэлектрики), толщин однослойных и многослойных покрытий (до 1000 нм), длин волн, проходящих через структуру покрытия (от 400 до 1570 нм).

Глава 2 посвящена выбору рациональных толщин волновода исходя из условия наибольшей плотности электромагнитной волны в диапазоне длин волн 400–700 нм, проходящей через каналы Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 . Выделены граничные условия и рассчитаны параметры на основании закона Снеллиуса для полного внутреннего отражения света в трехслойной системе «подложка-пленка-воздух»: угол ввода света в волновод $\leq 50^\circ$; минимальная толщина волновода составляет 94, 234 и 41 нм для Al_2O_3 , SiO_2 и TiO_2 соответственно; номера оптической моды ($m = 1$ и $m = 2$). Однослойный волновод из Al_2O_3 рекомендуется формировать для одномодового и многомодового режимов толщиной от 64 нм.

Однако конкретные числовые значения получены в результате компьютерного моделирования в COMSOL Multiphysics (ver. 6.2). Стационарная задача решалась методом конечных элементов в 2D плоскости. Варьировались параметры толщины волновода от 100 до 700 нм и длина волны оптического сигнала, проходящего через Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 в диапазоне видимого спектра 410–683 нм. Гауссов пучок света попадает в левый торец волновода под углом 10° , далее за счет явления полного внутреннего отражения сталкивается с границами раздела сред более 10 раз и выводится справа. На Рисунке 2 представлены средние значения напряженности электрического поля при изменении длины волны пучка видимого света.

Результатом моделирования является набор толщин волновода, при которых выбор материала среды распространения сигнала (Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2) практически не влияет на количественный показатель работы. Толщины 150, 430 и 615 нм относятся к зонам повышенного интереса (выделено прямоугольником на Рисунке 2), поскольку обладают минимальным расхождением напряженности: соответственно $(1,28 \pm 0,13)$, $(2,01 \pm 0,22)$, $(2,68 \pm 0,39)$ В/м. Для такого набора толщин возможно формирование однослойных и многослойных волноводных структур.

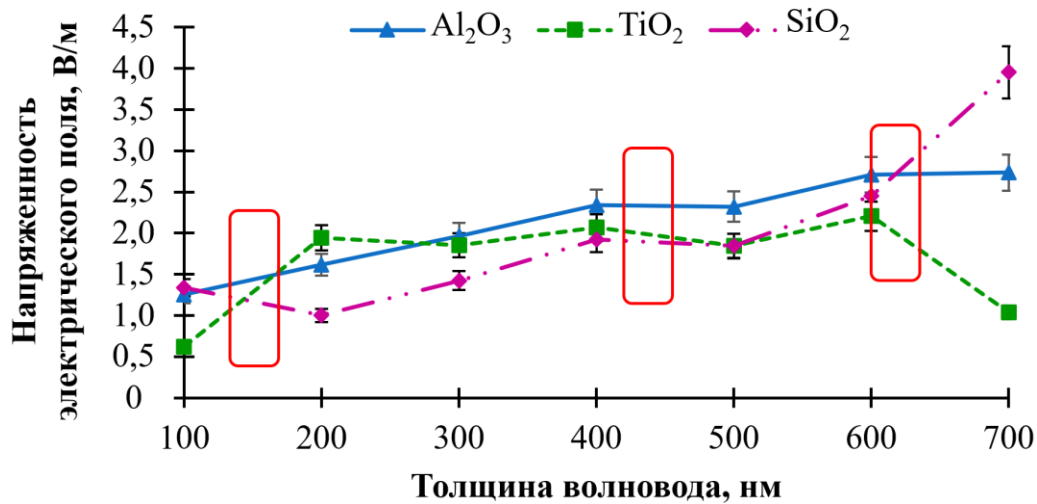


Рисунок 2. Результат численного моделирования напряженности электрического поля (средние значения)

В ходе анализа выявлено, что существует связь ОМН системы «пленка-подложка» с шероховатостью подложки и технологическими параметрами осаждения покрытий: давления в камере, мощности разряда и расхода рабочего газа. Управлять уровнем шероховатости подложки возможно несосредоточенным ионным пучком аргона.

Численное решение многопараметрической модели методом конечных элементов выражает зависимость ОМН системы «пленка-подложка» от толщины покрытия (100–1000 нм) при варьировании шероховатости (1–10 нм) и сосредоточенной силы для отслаивания покрытия от подложки 0,1, 10–50 и 100 Н. Разрушение адгезионной прочности является инструментом исследования ОМН в системе «пленка-подложка» и граничным предельным условием для моделирования. Модель построена на условии, что наибольшие значения ОМН системы «пленка-подложка» соответствуют состоянию механического равновесия.

Анализ результатов компьютерного моделирования позволил определить диапазон толщин покрытия для внутренних напряжений σ_B (растягивающие напряжения) и ОМН σ системы «пленка-подложка» (сжимающие напряжения). Уравнением (1) описывается граница раздела данных зон в МПа.

$$\sigma < \sigma_{S-K} = 2,26 \cdot 10^{-3} \cdot \delta - 1 < \sigma_B, \quad (1)$$

где $\delta \in [500; 850]$ – толщина покрытия, нм.

ОМН наиболее чувствительны к шероховатости подложки для зоны внутренних напряжений ввиду малых толщин покрытия. Результаты компьютерного моделирования в COMSOL Multiphysics (ver. 6.2) позволили выявить требуемые значения шероховатости поверхности подложки. Для любой рассматриваемой силы отслаивания покрытия толщиной от 100 до 350 нм наибольшие выдерживаемые ОМН, при которых не происходит разрушения адгезионной прочности, соответствуют шероховатости от 2 до 5 нм. Из этого сформулировано требование повышения шероховатости подложки ионной обработкой (ИО).

Построена зависимость усредненных значений ОМН от толщины покрытия при различной шероховатости и силе отслаивания (Рисунок 3).

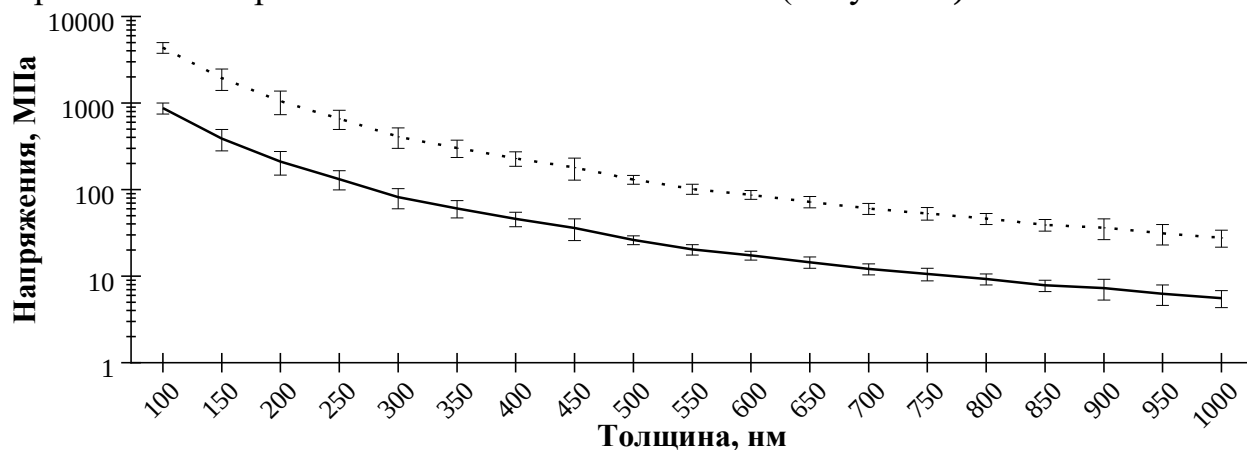


Рисунок 3. Результат моделирования напряжений при разных силах отслаивания (20, 30, 40 Н не показаны);
сплошная линия – 10 Н; пунктирная линия – 50 Н

Величина силы отслаивания определяет смещение полученных зависимостей по оси напряжений, которые описываются степенной функцией с относительной погрешностью не более 7,43 %.

На основе аналитического подхода, обеспечивающего точность вычислений более 90 %, и проведенного упрощения получено уравнение (2) для расчета ОМН (МПа) в покрытии толщиной δ (нм) с учетом влияния силы отслаивания $F_{отс}$ (Н).

$$\sigma = 2,59 \cdot 10^3 \cdot F_{отс} \cdot \delta^{-2,22}, \delta \in [100; 1000], F_{отс} \in [0,1; 100] \quad (2)$$

По результатам моделирования среднее значение абсолютной погрешности уравнения (2) составляет 16 МПа, а относительной – 3,43 %.

Глава 3 посвящена технологическому и исследовательскому оборудованию для формирования тонкопленочных покрытий в вакууме с целью последующей оценки уровня ОМН в системе «пленка-подложка».

Вакуумная установка «МВТУ-11-1МС» расположена на кафедре «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ имени Н.Э. Баумана в лаборатории «Нано- и микротехнологии» и состоит из безмасляной системы откачки до высокого вакуума спиральным и турбомолекулярным насосами. На нижнем фланце камеры установлены кольцевой бессеточный источник ионов (ИИ) с холодным катодом (номинальный размер ионного пучка – $\varnothing$ 23 мм) и система магнетронного распыления (мишень – $\varnothing$ 50,8 мм).

До модернизации ИИ закреплен неподвижно на нижнем фланце KF-63 вакуумной камеры, что не позволяло равномерно обрабатывать и очищать всю поверхность подложки, размер которой превышает размер пучка.

Разработана и изготовлена система (Рисунок 4) наклона ИИ, состоящая из сильфона на фланце ISO-100 длиной 100 мм, элементов крепежа, передачи винт-гайка скольжения, линейной прямоугольной направляющей и гибридного шагового двигателя. Контроль положения происходит при помощи оптического и концевого датчиков. Система имеет программируемый контроллер для управления положениями: «номинальное расположение» (поток ионов вдоль оси Z,

Рисунок 4, а), «сканирующее движение» (циклический наклон ИИ от -15° до $+15^\circ$ вокруг оси Y' , Рисунок 4, а), «заданный угол» (наклон и фиксирование ИИ в заданном положении).

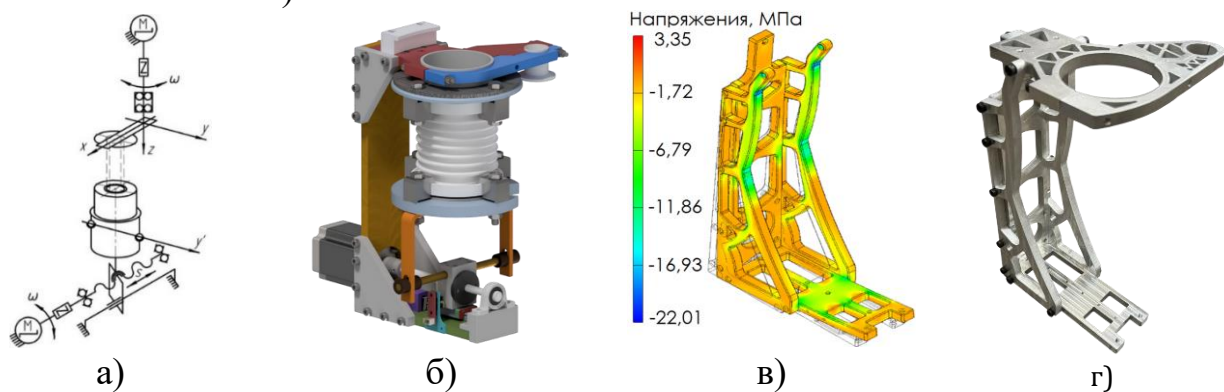


Рисунок 4. Система наклона ИИ: принципиальная схема (а), предварительная 3D модель системы в сборе (б), результат топологической оптимизации рамы (в) и физическое исполнение рамы в сборе (г)

Закрепление несущей алюминиевой рамы выполнено с помощью разрезного хомута. Базирование происходило по плоскости дна вакуумной камеры и двум фланцам на ней. Рама равномерно воспринимает реактивную нагрузку от изгиба сильфона. Топологическая оптимизация рамы проведена в среде «Компас-3D» (ver. 24) с помощью модуля «Автоматизированная прочностная модель методом конечных элементов» (APM FEM) при ограничениях симметрии, минимальной толщины и энергии деформации. После оптимизации максимальное смещение рамы снизилось с 3,1 до 0,3 мм, растягивающие напряжения – с 243 до 19 МПа, а сжимающие – с 62 до 22 МПа. Проверочный расчет выполнен в среде Autodesk Inventor Professional (ver. 25) методом конечных элементов при статическом нагружении. Для крепежных резьбовых соединений рассчитаны номинальные диаметры резьбы, моменты затяжки и подобран материал изделий из условий прочности на растяжение, эквивалентных напряжений и предела текучести.

Характеристики покрытий исследованы на поверенном оборудовании или с применением откалиброванных приборов. Электронной микроскопией измерена толщина покрытий (30–1800 нм) на поперечных сколах подложек и проведен качественный анализ дефектности структур. Оптической профилометрией измерен рельеф поверхности (2,0–52,5 мкм) для последующего расчета ОМН системы «пленка-подложка». Зондовым микроскопом измерена шероховатость поверхностей (1,5–8,0 нм) подложек и покрытий. Соответствие состава покрытий материалу мишени оценивалось на основе масс-спектрометрического (интенсивность детектирования 10–1700 ед.) и рентгенфлуоресцентного анализа (примеси 0,03–0,08 %). Эллипсометрией определен показатель преломления тонкопленочных структур (1,46–1,88) и номер оптической моды (1 или 2). Спектрофотометрия отражения позволила определить коэффициенты пропускания (79,3–98,3 %) и отражения (2,1–33,8 %) для видимого диапазона длин волн. Растровая электронная микроскопия в режиме энергодисперсионного микроанализа применялась для определения фазового и элементного составов покрытий.

Глава 4 посвящена оценке решений по технологическому процессу снижения уровня ОМН в системе «пленка-подложка».

Подложки из Si (100) и кварцевого стекла перед осаждением покрытий обрабатывались ИИ, который работал в режиме стабилизации тока 30 мА при среднем ускоряющем напряжении разряда (2190 ± 405) В для повышения уровня шероховатости. Газ аргон марки 5,5 поступал в ИИ с расходом $2 \text{ см}^3/\text{мин}$, обрабатывая поверхность подложки при давлении $(5,34 \times 10^{-2} \pm 2,70 \times 10^{-2})$ Па. Аппроксимация данных экспериментальных исследований позволила рассчитать оптимальную равномерность скорости ионного травления ИИ 65,6 %, достигающую экстремума при расстоянии источник-подложка 140 мм.

Экспериментально рассчитана энергия ионов аргона $E_{Ar} = (371 \pm 31)$ эВ, сопоставленная с коэффициентом распыления Si (100) $Y_{Si} = (0,319 \pm 0,025)$ атом/ион. При таких условиях происходит изменение шероховатости подложки и покрытия. На основе дифференцирования значений толщин покрытий по времени рассчитаны скорости травления Al_2O_3 , SiO_2 и TiO_2 , которые равны 246, 510 и 120 нм/ч соответственно.

Измерение шероховатости выполнено предварительно в области 10×10 мкм, далее сканирование трех квадратов 2×2 мкм в данной зоне позволило оценить влияние ИО на изменение топологии. Зависимость шероховатости покрытий Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 от времени их обработки показана на Рисунке 5.

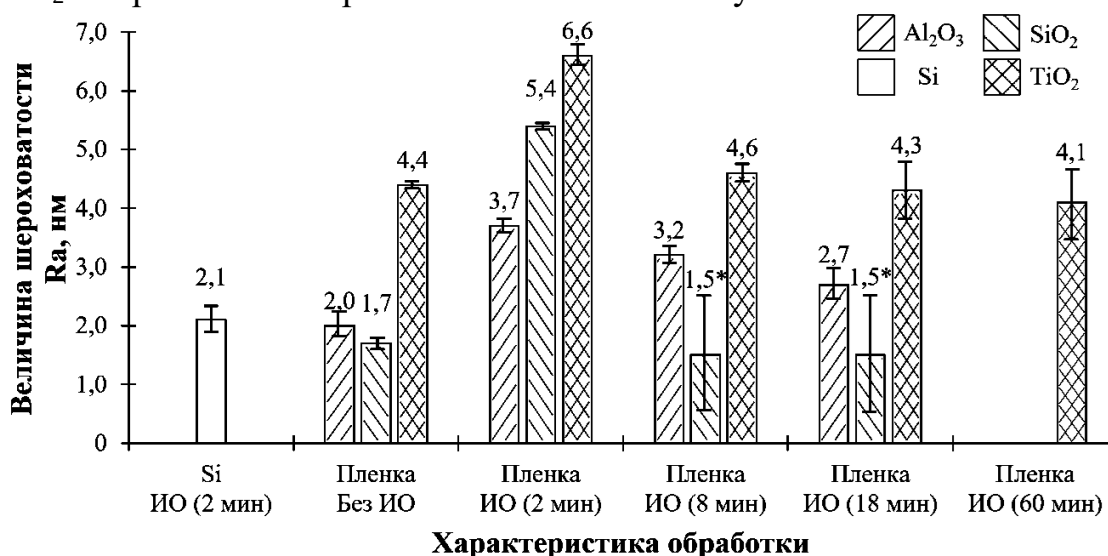


Рисунок 5. Зависимость шероховатости покрытий Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 от времени обработки

Для данных покрытий наблюдался первоначальный рост шероховатости при времени обработки 2 мин с последующим ее снижением. Покрытие TiO_2 характеризовалось более высоким уровнем шероховатости, связанным с анизотропной столбчатой структурой, выявленной по снимкам сканирующего электронного микроскопа. Значение шероховатости при времени обработки 60 мин представлено только для покрытия TiO_2 . Покрытия Al_2O_3 и SiO_2 имели исходную толщину 213 нм и полностью распылились с подложки. Толщина TiO_2 составляла 531 нм. Изменение времени ИО в пределах 18–60 мин не оказывает существенного влияния на параметры шероховатости покрытия. Эффект выравнивания

поверхности подтвержден снимками электронного микроскопа при кратности увеличения 5, 25 и 50 тыс.

На Рисунке 6 представлена зависимость среднего приращения величины шероховатости подложки и покрытий относительно базового уровня шероховатости подложки без покрытия. Варьируемыми факторами являлись время обработки подложки – 0, 120 и 600 с, толщина покрытия Al_2O_3 – 150, 430 и 615 нм. Выявлен нелинейный характер изменения шероховатости: при обработке в течение 120 с шероховатость Si и КС увеличилась с 1,80 и 2,15 нм до 2,40 и 3,10 нм соответственно, а к 600 с шероховатость снизилась до 1,60 и 2,40 нм.

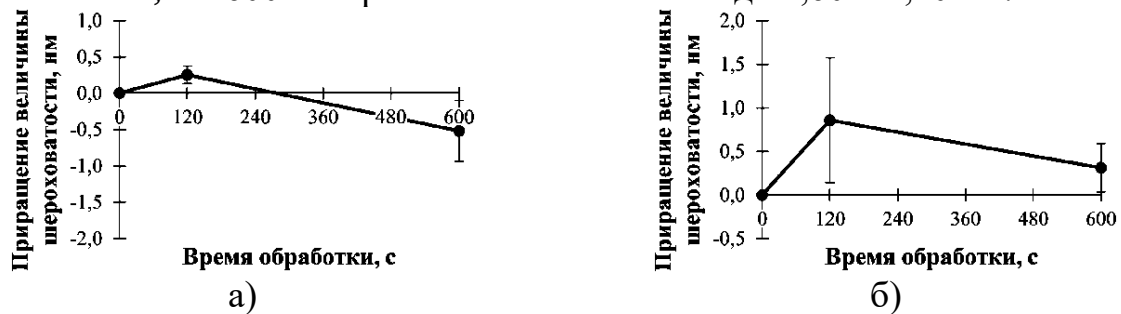


Рисунок 6. Величина среднего по значениям приращения величины шероховатости подложки Si (а) и КС (б)

Таким образом, время обработки поверхности подложки 120 с увеличило ее шероховатость и является рациональным среди выбранных значений.

Покрyтия формировались из мишеней диаметром 50,8 мм заданного стехиометрического состава Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 по ТУ 28.29.70-800.56631876-2017 от ООО «Гирмет» методом высокочастотного (13,56 МГц) магнетронного распыления в режиме стабилизации мощности 60 Вт, при расходе аргона $30 \text{ см}^3/\text{мин}$ и давлении в камере $(3,51 \times 10^{-1} \pm 1,25 \times 10^{-2})$ Па. Напряжения разряда для мишеней Al_2O_3 , SiO_2 и TiO_2 составляли (455 ± 48) , (635 ± 14) и (363 ± 59) В соответственно. Температура подложки без принудительного нагрева в процессе осаждения покрытий составляла $(55,5 \pm 8,6) ^\circ\text{C}$.

Перед формированием покрытий проведена отработка скоростей осаждения Al_2O_3 , SiO_2 и TiO_2 для расстояния «мишень-подложка» 81 мм, расчет которых показал величины 18, 168 и 90 нм/ч соответственно. Равномерность толщины покрытий на подложке диаметром 76 мм составляет 92 % по критерию «средняя толщина» и 85 % по критерию «максимум/минимум».

Регрессионный анализ выявил, что для увеличения скорости осаждения материалов Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 на 14,5 % необходимо увеличивать расход газа аргона с 20 до $40 \text{ см}^3/\text{мин}$. Для Al_2O_3 и TiO_2 увеличение расхода газа с 20 до $40 \text{ см}^3/\text{мин}$ увеличивает коэффициент отражения покрытий с 9,7 до 20,4 %, для SiO_2 – уменьшает с 29,7 до 18,5 %. Для Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 увеличение давления в вакуумной камере с 0,44 до 0,68 Па уменьшает коэффициент отражения с 20,8 до 15,3 %.

В работе исследовано влияние времени ИО (0, 120 и 600 с) покрытия Al_2O_3 толщиной 150, 430 и 615 нм на уровень ОМН для кремниевой подложки толщиной (373 ± 7) мкм и диаметром 76 мм (Рисунок 7). Перед осаждением подложки обрабатывались ИИ в течение 120 с. Измерения учитывают начальную кривизну подложек.

Толщина покрытия 430 нм демонстрирует наименьший уровень напряжений (по среднему): -236 МПа в сравнении с -656 и -296 МПа для толщин 150 и 615 соответственно.

ИО поверхности покрытия уменьшила разброс значений и уровень ОМН. Независимо от толщины покрытия рекомендуется проводить ИО в течение 120 с. Среднее значение ОМН для времени ИО покрытия 120 с на 9,55 % ниже значения, зафиксированного для времени 600 с.



Рисунок 7. Влияние толщины Al_2O_3 и времени ИО покрытия на подложке Si

Обнаружено, что исходный вид неплоскостности подложки влияет на уровень ОМН (Рисунок 8). Вогнутой считается подложка, центр которой расположен ниже относительно периферии, выпуклой – центр выше периферии.

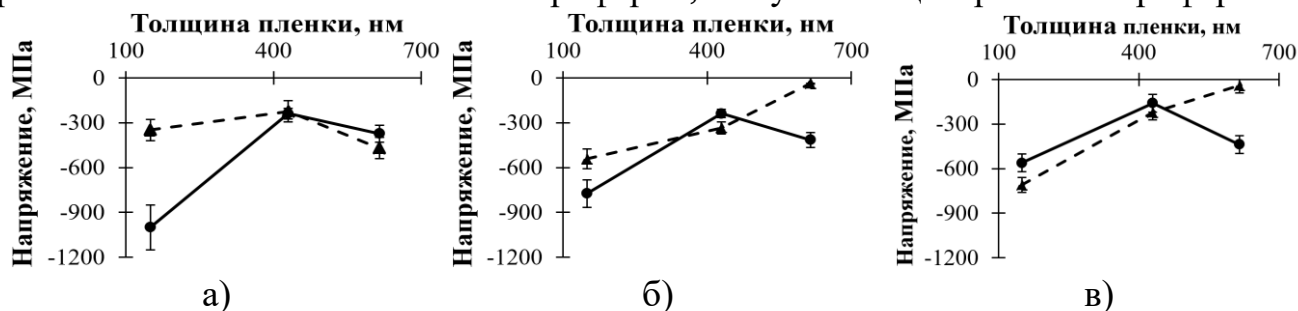


Рисунок 8. Влияние неплоскостности подложки на величину ОМН при времени ИО покрытий: без ИО (а), 120 с (б) и 600 с (в); сплошная линия – вогнутая подложка; пунктирная линия – выпуклая подложка

Существенное влияние неплоскостности подложки наблюдалось для Al_2O_3 без ИО толщиной 150 нм. ОМН для вогнутой подложки превысили напряжения выпуклой из-за отсутствия релаксации напряжений роста и уменьшения радиуса кривизны подложки, сопротивляющейся изменению формы при упругой деформации. При толщине покрытия 430 нм для времен ИО 120 и 600 с характерно небольшое расхождение результатов измерения за счет распределения напряжений в структуре покрытия. Однако для более толстых покрытий (615 нм) вогнутая подложка демонстрировала увеличение модуля сжимающих ОМН за счет накопления напряжений в структуре и малого сопротивления подложки деформациям.

Разрушение адгезионной прочности « Al_2O_3 –Si» происходило при отсутствии ИО подложки вне зависимости от толщины покрытия. Площадь разрушения Al_2O_3 наблюдалась в диапазоне от 15 до 65 % для участка измерения 10 см^2 .

Зафиксировано, что для времени обработки 600 с разрушение адгезионной прочности по площади менее 5 % соответствует толщине 615 нм. Система «Al₂O₃–КС» показала высокую адгезию – для 9 образцов нет отслоения, поскольку шероховатость поверхности КС выше, чем у Si (см. Рисунок 6).

В Главе 5 представлена и апробирована разработанная методика по снижению ОМН, состоящая из 6 этапов, учитывающая требование поддержания шероховатости от 2 до 5 нм с последующим осаждением оксидных структур.

Апробация методики проведена на балочных структурах из КС (Рисунок 9).



Рисунок 9. Влияние толщины Al₂O₃ и времени ИО покрытия на подложке КС

Для толщин покрытий 430 и 615 нм наличие ИО уменьшало уровень сжимающих ОМН на 21,6 и 14,1 % соответственно. При этом чем больше время воздействия, тем меньше уровень ОМН. Однако для толщины покрытий 150 нм такая закономерность не наблюдалась.

Измерение адгезионной прочности при ИО подложки проведено на многослойной структуре «ситалл–Al₂O₃–Cu». Анализ этой системы показал, что время ИО подложки не влияет на адгезию «Al₂O₃–ситалл», но после формирования покрытия Cu на поверхности Al₂O₃ произошло разрушение адгезионной прочности «Cu–Al₂O₃» для времени ИО 0 и 600 с.

Кроме того, апробация методики уменьшения ОМН проведена на многослойной структуре «Si–TiO₂–SiO₂» с числом слоев TiO₂–SiO₂: 1, 2 и 4 (Рисунок 10). Приведены данные о материалах и напряжениях структур, сформированных по разработанной в диссертационной работе методике и без нее.

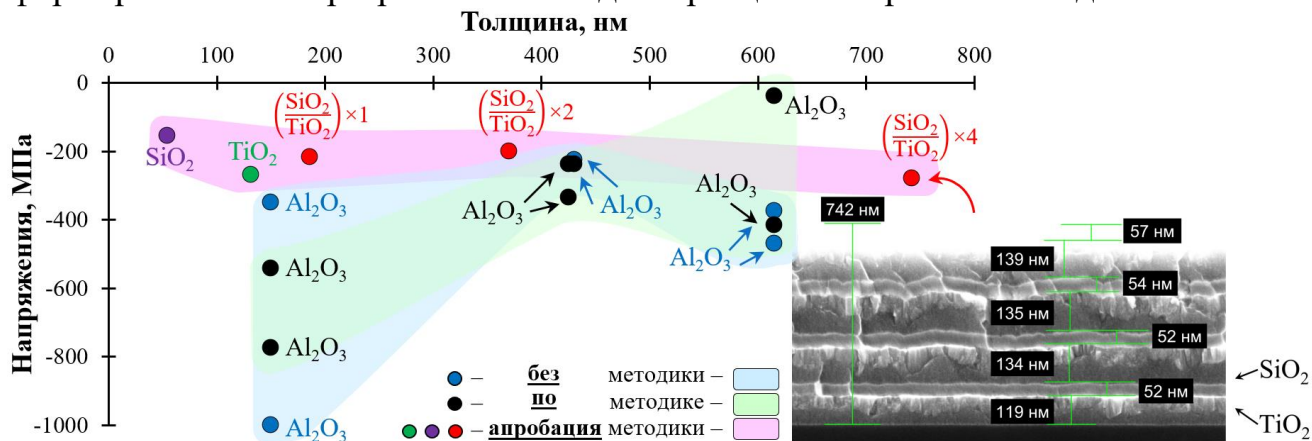


Рисунок 10. Оценка ОМН для однослойных покрытий TiO₂, SiO₂, Al₂O₃ и многослойной структуры TiO₂–SiO₂

Сравнение результатов моделирования в Главе 2 и экспериментальных данных (Рисунок 11) проведено для силы отслаивания покрытия от подложки ($20 \pm 0,05$) Н, исходя из комбинаций профиля подложки, времени ИО и толщины покрытия, для которых произошло разрушение адгезионной прочности.

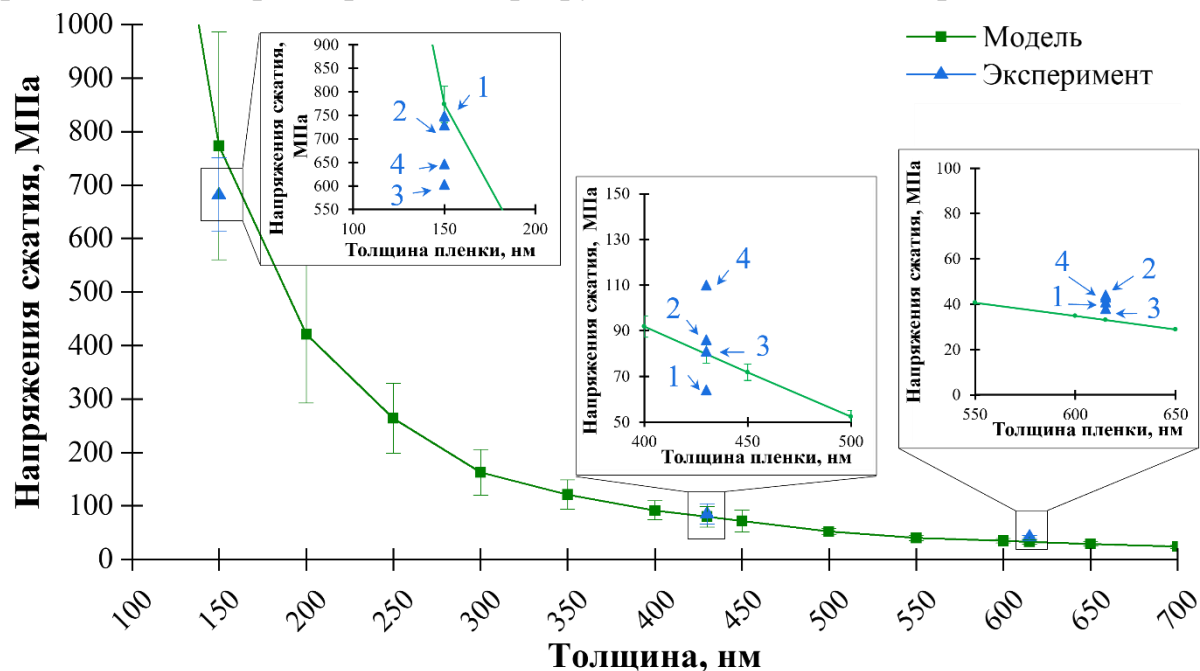


Рисунок 11. Апробация методики уменьшения ОМН покрытий

Абсолютные величины и их среднеквадратичные отклонения ОМН для покрытий с толщинами 150, 430 и 615 нм равны (682 ± 69) , (85 ± 19) и (42 ± 3) МПа соответственно.

Проведена оценка коэффициентов преломления SiO_2 и TiO_2 на длине волны 636 нм, которые равны 1,4791 и 1,8824 соответственно. Погрешность измерений составила 0,009 %. Значения коэффициента пропускания покрытий TiO_2 , SiO_2 и Al_2O_3 без ИО и после нее представлены в таблице.

Влияние коэффициента пропускания покрытий TiO_2 , SiO_2 и Al_2O_3

Слои структуры	До ионной обработки		После ионной обработки	
	Длина волны, нм	Коэффициент пропускания, %	Длина волны, нм	Коэффициент пропускания, %
Al_2O_3 (430 нм)	406	$79,39 \pm 0,65$	422	$82,16 \pm 0,43$
	556	$91,76 \pm 0,25$	585	$92,41 \pm 0,31$
	918	$96,21 \pm 0,13$	966	$96,49 \pm 0,05$
SiO_2 (54 нм)	515	$85,28 \pm 0,26$	481	$83,44 \pm 0,24$
	1047	$79,31 \pm 0,67$	1077	$83,71 \pm 1,08$
TiO_2 (132 нм)	434	$98,01 \pm 0,06$	430	$98,33 \pm 0,46$
	1031	$91,35 \pm 0,20$	1020	$91,73 \pm 0,37$

Среднее приращение коэффициента пропускания для всего спектра длин волн составило 1,52 %, что ввиду абсолютного среднего уровня 89,26 % считается несущественным.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Литературный обзор по тематике показал, что однослойные и многослойные оксидные тонкопленочные покрытия, применяемые в волноводных структурах, подвержены влиянию сжимающих и растягивающих механических напряжений до $-2,5$ и $2,0$ ГПа соответственно. ОМН разрушают структуру покрытий, снижая работоспособность и долговечность устройств на их основе, ухудшая функциональные характеристики. Анализ факторов показал, что возникновение ОМН может быть связано с разными типами решетки «пленка оксида-подложка», размерами покрытия, наличием дефектов на границе раздела «пленка оксида-подложка» и в покрытии. В результате анализа технологических способов снижения ОМН в системе «пленка оксида-подложка» рекомендуется контролировать и управлять толщиной тонкопленочного покрытия, влиять на шероховатость подложки с помощью ионной обработки при энергиях от 50 до 3000 эВ для снижения количества концентраторов напряжения.

2. По результатам расчета установлено, что для работы волноводных структур за счет эффекта полного внутреннего отражения в видимом спектре длин волн при одно- и двумодовом режиме необходимо обеспечить толщину TiO_2 , Al_2O_3 и SiO_2 от 16, 64 и 203 нм соответственно. По результатам моделирования для высокого уровня адгезии « $\text{Si}-\text{Al}_2\text{O}_3$ » рекомендуется обеспечить шероховатость подложки Sa от 2 до 5 нм для толщин покрытия от 100 до 350 нм при силе отслаивания покрытия от подложки от 10 до 50 Н, при этом механические напряжения системы «пленка-подложка» достигают значения до 4369 МПа.

3. Разработанная система наклона источника ионов, состоящая из сильфона, передачи винт-гайка и рамы, повысила площадь обработки на 41 % при времени травления покрытия 450 с (с 1600 до 2263 мм^2). Автоматизация выполнена за счет шагового двигателя (nema 23), драйвера (smsd 1.5) и контроллера на базе процессора (ATmega 2560).

4. Экспериментально определено, что ионная обработка аргоном в течение 2 мин с энергией (371 ± 31) эВ и плотностью ионного тока 208 А/м^2 увеличивает шероховатость поверхности подложки и оксидных покрытий. При этом минимальный уровень сжимающих напряжений обеспечивается при формировании покрытий толщиной от 150 до 430 нм на выпуклую подложку, для покрытий от 430 до 615 нм – на вогнутую.

5. Разработанная методика снижения ОМН в многослойных (от 2 до 8 слоев) наноразмерных структурах с толщинами слоев от 50 до 150 нм учитывает выбор выпуклой подложки для суммарной толщины слоев менее 430 нм и вогнутой – от 430 до 615 нм, предварительную ионную обработку подложки в течение 2 мин и последующий этап магнетронного распыления при отработанных режимах (давление 0,35 Па, расход газа 30 $\text{см}^3/\text{мин}$, мощность 60 Вт) для обеспечения требуемой толщины слоев, коэффициентов преломления, отражения (пропускания).

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Оценка влияния толщины покрытия на величину остаточных механических напряжений в $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}$ / А. Д. Купцов [и др.] // Наноиндустрия. 2024. Т. 17, № 6. С. 372-381. (0,63 п.л./ 0,13 п.л.).
2. Остаточные напряжения на интерфейсе пленка-подложка / А. Д. Купцов [и др.] // Нано- и микросистемная техника. 2025. Т. 27, № 1. С. 15-24. (0,63 п.л./ 0,31 п.л.).
3. Оценка влияния ионной обработки на величину остаточных механических напряжений в $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}$ / А. Д. Купцов [и др.] // Наноиндустрия. 2025. Т. 18, № 2. С. 148-159. (0,75 п.л./ 0,15 п.л.).
4. Формирование в вакууме композиционного слоя с островковыми наноструктурами / А. Д. Купцов [и др.] // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2025. Т. 28, № 2. С. 94-106. (0,81 п.л./0,20 п.л.).
5. Тонкоплёночные электроды актуаторов на основе диэлектрического эластомера для системы виброизоляции / А. Д. Купцов [и др.] // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2024. Т. 23, № 3. С. 154-166. (0,81 п.л./0,16 п.л.).
6. Исследование параметров актуатора на основе диэлектрического эластомера для системы активной виброизоляции / А. Д. Купцов [и др.] // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2025. Т. 24, № 2. С. 98-108. (0,69 п.л./0,14 п.л.).
7. Расчет параметров и моделирование системы ионной обработки в вакууме / А. Д. Купцов [и др.] // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2026. Т. 29, № 1. С. 40-54. (0,94 п.л./0,31 п.л.).
8. Тонкие пленки оксидов для лазерных зеркал / А. Д. Купцов [и др.] // Наноиндустрия. 2026. Т. 19, № 2. С. 144-152. (0,56 п.л./0,19 п.л.).
9. Application of island thin films for microelectronics devices / A. D. Kouptsov [et al.] // 5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). IEEE. M., 2023. Vol. 5. P. 1-6. (0,38 п.л./0,09 п.л.).
10. Reduction of Residual Stresses in Aluminum Oxide Films by Ion-Plasma Methods / A. D. Kouptsov [et al.] // 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). IEEE. M., 2024. P. 1-4. (0,25 п.л./0,08 п.л.).
11. Automatic Heating Technology Module / A. D. Kouptsov [et al.] // 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). IEEE. M., 2024. P. 1-5. (0,31 п.л./0,16 п.л.).
12. Automated System of Substrates Positioning and Processing in Vacuum / A. D. Kouptsov [et al.] // International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE. M., 2025. P. 255-259. (0,31 п.л./0,10 п.л.).