

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель генерального
директора по науке и инновациям АО
«НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха

к.т.н. Вылегжанин Г.Н.

«24» 02 2025 года



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

диссертация Пушкина Дмитрия Борисовича на тему «Разработка основ технологии нанесения диэлектрических плёнок методом ионно-лучевого распыления мишеней в среде кислородной ВЧ плазмы для оптических покрытий ближнего ИК диапазона», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.3 — «Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники»

Актуальность темы

Актуальность темы диссертации Д.Б. Пушкина определяется широким применением оптических систем в различных областях науки и техники, в частности, в лазерных системах различного назначения, в прецизионных оптических системах, в системах спутниковой связи, в медицине и др. Зеркала, фильтры и просветляющие покрытия, с одной стороны, являются ответственными элементами таких систем, требующими максимальной оптимизации своих характеристик, а с другой стороны, они могут быть весьма уязвимыми к различным внешним воздействиям. В частности, воздействие лазерного излучения может привести к повреждению и даже к разрушению этих элементов, что создаёт повышенные требования к их качеству и, следовательно, выдвигает новые актуальные задачи по разработке данных элементов с требуемыми характеристиками, включая разработку технологии нанесения диэлектрических покрытий. Диссертация Д.Б. Пушкина посвящена поиску новых технических и технологических решений в этой области для оптических систем ближнего ИК диапазона и, следовательно, является актуальной.

Целью диссертации Д.Б. Пушкина являлась разработка технологии нанесения диэлектрических плёнок методом ионно-лучевого распыления мишеней в среде кислородной ВЧ-плазмы для оптических покрытий ближнего ИК-диапазона, причём разработанные основы технологии могут быть унифицированы для производства оптических покрытий разных типов, в частности, поляризаторов, дихроичных зеркал, коротковолновых и длинноволновых спектральных фильтров, просветляющих покрытий. Для достижения указанной цели автором были решены следующие задачи: анализ научной литературы, посвященной свойствам оптических покрытий, а также методикам их расчета, аналитических исследований; исследование результатов применения различных технологических особенностей нанесения тонких диэлектрических пленок на их оптические свойства; изучение влияния физических параметров материалов (таких, как коэффициент экстинкции) на общее поглощение в оптических покрытиях различного типа; изучение влияния ионной поддержки с разной энергией, на характеристики как отдельных монослоёв, так и финальных покрытий.

Оценка научной новизны результатов диссертации

В диссертации Д.Б. Пушкина были получены результаты, характеризующихся научной новизной:

Во-первых, автором впервые предложена и реализована на примере многослойной структуры $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ люминесцентная дефектоскопия тонкопленочных покрытий.

Во-вторых, разработана технология получения высокоэффективных оптических поверхностей методом ионно-лучевого распыления в условиях ВЧ-плазмы и в среде атомарного кислорода.

В-третьих, получены новые результаты исследования влияния ионной поддержки с энергией 150—300 эВ на коэффициент зеркального отражения и поглощения в диэлектрических зеркалах и оптических фильтрах с высоким значением крутизны фронта пропускания.

В-четвертых, получены новые результаты исследования взаимодействия ионного пучка с распыляемой мишенью и определена зависимость индикатрисы распыления материалов от бомбардирующего пучка ионов.

В-пятых, показано, что напыление в среде атомарного кислорода с энергией ионов не более 50 эВ посредством использования источника ионов без ускоряющего потенциала, работающего по принципу индуктивно-связанной плазмы в ВЧ-разряде, позволяет минимизировать влияние энергии ионов на структуру получаемых плёнок.

Практическая значимость результатов диссертации

Практическая значимость результатов диссертации Д.Б. Пушкина

определяется следующим.

- Показано, что разработанная технология получения высокоэффективных оптических покрытий в условиях кислородной ВЧ-плазмы атомарного кислорода позволяют изготавливать зеркала с отражением свыше 99,99 % в диапазоне длин волн от 700 до 1400 нм. В том числе взят за основу перспективный метод измерения сверхвысоких коэффициентов отражения способом оценки времени затухания излучения в оптическом резонаторе, а также предложен способ измерения остаточного поглощения в тонких плёнках термогравиметрическим методом. Кроме того, данный метод получения оптических поверхностей позволяет сократить время проведения технологического процесса на 20% и повысить его производительность.
- Разработана конструкция и изготовлено покрытие оптического фильтра со значением крутизны коротковолнового фронта пропускания до 1,003 (отношением коротковолновой границы рабочего диапазона к длине волны, соответствующей уровню пропускания $T = 60 \%$) и малыми потерями на поглощение. Доказана возможность изготовления такого фильтра.

Практическая значимость также подтверждается внедрением результатов диссертации в производство диэлектрических зеркал с высоким отражением для стенда по измерению потерь методом затухания сигнала в оптическом резонаторе. В том числе результаты диссертации внедрены в технологию изготовления сканирующих лазерных систем и аддитивных принтеров для селективной лазерной печати в части комплектации данных систем коротковолновыми дихроичными фильтрами с малыми потерями для сведения двух оптических путей в один. Данные оптические элементы позволили совместить в один оптический путь импульсное (200 Вт средней мощности) и постоянное (500 Вт) лазерное излучение в целях формирования в ванне расплава материал с меньшим размером зерна, что дало возможность повысить прочность изготавливаемых при 3d лазерной печати изделий.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов диссертации подтверждается корректностью формулировки цели и постановки задач, существенным объемом полученных экспериментальных данных и их анализов на основе имеющихся литературных данных по тематике диссертации, применением в исследованиях современного технологического, измерительного и исследовательского оборудования, апробацией и обсуждением основных результатов на российских и международных научно-технических конференциях. Из приведенного списка публикаций Д.Б. Пушкина видно, что все основные результаты и выводы диссертации в достаточном объеме опубликованы в авторитетных изданиях. По теме диссертационного исследования опубликовано 6 печатных работ

в авторитетных научных изданиях, в том числе 3 статьи в изданиях, индексируемых в базах данных SCOPUS и Web of Science, 2 статьи в сборнике научных трудов Харитоновских тематических научных чтений «Современные лазерные технологии», 1 статья в трудах международной научно-технической конференции. Всё это подтверждает достоверность результатов и выводов диссертации.

Оценка содержания диссертации

Диссертация Д.Б. Пушкина состоит из общей характеристики диссертации, введения, шести глав, выводов, списка опубликованных источников (101 наименование). Работа изложена на 134 страницах, содержит 63 рисунка и 8 таблиц. Оформление работы соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

В разделе «Общая характеристика работы» обоснована актуальность темы диссертации, определена цель проводимых исследований и сформулированы основные задачи. Представлены основные положения, выносимые на защиту, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, приведены сведения по апробации результатов диссертации и личному вкладу автора.

Во введении приведены аргументы в обоснование актуальности темы исследований, определяющие выбор цели и постановку решаемых задач.

Первая глава представляет собой обзор литературных данных, посвященных существующим методам нанесения оптических покрытий. Здесь рассмотрены следующие методы: термическое испарение, электронно-лучевое испарение с ионным assisteрованием, магнетронное распыление, высокочастотное ионно-лучевое распыление (ВЧ ИЛР). Показано, что для задач по созданию диэлектрических покрытий и фильтров с малыми потерями наиболее предпочтительным является метод ВЧ ИЛР.

Во второй главе приведены исследования энергетических характеристик источника окисления и источника распыления из состава используемой установки нанесения оптических покрытий методом ВЧ ИЛР. Описывается метод исследования вольт-амперных характеристик ионного источника и эффективности генерации ионного тока; описывается метод измерений распределения плотности ионного тока в пучке и энергетических параметров ионного пучка; приведены и проанализированы результаты исследования энергетического распределения ионов в пучке для различных точек и различных разрядных напряжений; приведены результаты зондовых измерений ионно-энергетических характеристик источника ионов индуктивно-связанной плазмы кислорода; проанализированы условия взаимодействия пучка ионов с распыляемой мишенью и сделаны выводы по оптимальному расположению распыляемой мишени относительно оси распространения ионного пучка.

В третьей главе рассмотрены вопросы использования компьютерного моделирования в технологии изготовления оптических покрытий и приведены

результаты моделирования с помощью программы «OptiRe» из состава программного комплекса «OptiLayer» многослойного зеркала, представляющего собой структуру, состоящую из чередующихся тонких слоев SiO_2 и Ta_2O_5 материалов, входящих в состав данного оптического покрытия, определены спектральные зависимости показателя преломления.

Четвёртая глава посвящена исследованию поглощения в тонких оптических плёнках. Здесь проведён анализ литературных данных, посвящённых существующим методам измерения поглощения в оптических покрытиях; подробно рассмотрел фотометрический метод измерения поглощения света в тонких плёнках; приведено описание экспериментального стенда для определения поглощения света в тонких плёнках; для различных материалов приведены результаты измерения локального искривления поверхности зеркала, вызванного воздействием мощного лазерного излучения, а также приведены расчётные значения коэффициента экстинкции; на основании полученных результатов сделан выбор наиболее подходящих материалов для изготовления оптических покрытий с требуемыми характеристиками плёнок, нанесёнными методом ВЧ ИЛР в среде атомарного кислорода.

В пятой главе рассмотрен метод люминесцентного анализа дефектов и его особенности применительно к исследованию дефектов в тонких плёнках, в частности в тонких плёнках Ta_2O_5 и SiO_2 . На основе полученных экспериментальных результатов продемонстрирована возможность оценки концентрации дефектов в выращенных тонкоплёночных многослойных структурах с помощью люминесцентного анализа. Показано, что данный метод также применим для сравнения концентрации дефектов в разных образцах.

В шестой главе приведены результаты применения основ технологии нанесения диэлектрических плёнок методом ВЧ ИЛР для изготовления диэлектрического зеркала с малыми потерями. В качестве материалов слоёв использовались Ta_2O_5 и SiO_2 . Здесь проведено моделирование конструкции покрытия с использованием программного комплекса OptiLayer; приведены основные этапы технологического процесса изготовления оптического покрытия; представлены результаты измерения оптических характеристик полученного покрытия; проведено исследование состава плёнок диэлектрических зеркал методом рентгеновской рефлектометрии; приведены результаты сравнения характеристик полученного покрытия с некоторыми существующими конкурентными решениями.

В заключении диссертации представлены основные выводы, сформулированные по результатам исследования, и приведен список использованных источников из 101 наименования.

Рекомендации по использованию результатов диссертации

Результаты диссертации могут быть использованы в технологических процессах

по вакуумному осаждению прецизионных оптических покрытий, направлениях лазерного приборостроения и спектроскопии. Основными потребителями, заинтересованными в результатах данной диссертации, являются такие организации как: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ (ИЛФИ)», ООО НПП «Инжект», АО «ЛЗОС», ООО «Лассард», ООО «Росатом аддитивные технологии». В том числе, стоит отметить, что в настоящее время активно развивается отечественное электронное машиностроение под кураторством Министерства промышленности и торговли Российской Федерации, в данной программе предполагается изготовление массовое изготовление полупроводниковых пластин для нужд отечественной электроники и результаты настоящего научного труда могут быть использованы такими организациями как: АО «Микрон», АО «Нанотроника».

Замечания по диссертации:

1. В качестве одного из обоснований актуальности исследования, автор многократно ссылается на высокие требования диэлектрических покрытий к лучевой стойкости (и прочности), предъявляемые в современных лазерных системах. Однако в самой диссертации только в литературном обзоре приведены количественные оценки требований к лучевой стойкости и только для частных случаев. При этом удельные характеристики критических плотностей энергии излучения приводятся для импульсного воздействия сверхкоротких импульсов (сотни фс), в случае же непрерывного излучения приводятся лишь общие данные о средней мощности. Также в диссертации нет даже качественных описаний механизмов воздействия лазерного излучения на оптическое покрытие с целью обоснования возможности влиять на эти свойства.
2. В диссертации автора нигде не указано существенное влияние качества обработки поверхности (наличие нарушенного слоя) оптической детали на величину достигаемой предельной лучевой стойкости оптического покрытия. Также нигде не указано, что на получаемую лучевую стойкость покрытия существенно влияет сам материал, методы его обработки.
3. В главе 2 диссертации автор вводит утверждение о важности для роста и качества плёнки ионного ассистирования. Далее в диссертации приводятся подробные экспериментальные данные по измерению ВАХ ионного источника, распределению энергии пучков частиц, рассматриваются индикатрисы распыления материалов. Однако выводы главы 2, главный из которых заключается в использовании РЧ источника ассистирования, явно не следуют из рассмотрения самой главы.
4. Глава 3 посвящена моделированию диэлектрических покрытий. Основным недостатком главы является то, что не показано, какие преимущества дает моделирование в среде OptiLayer с практической точки зрения предлагаемой технологии.
5. В главе 5 нет описания калибровки исходного образца стекла К9. Также нет

данных об источнике силового излучения, длине волны. Нет данных о плотности мощности на образце. Приведена только абсолютная мощность источника нагрева, что является недостаточным для оценки достоверности применения метода.

6. Также в диссертации недостаточно подробно рассмотрен предлагаемый метод измерения сверхвысокого коэффициента отражения методом измерения времени затухания излучения в оптическом резонаторе

Указанные замечания не снимают научную новизну и практическую ценность диссертации и не оказывают существенного влияния на высокую оценку диссертации в целом.

Публичное обсуждение результатов диссертации, а также формирование и утверждение настоящего отзыва проходило на научно-техническом совете отделения оптических и информационных технологий АО «НИИ НПО «ЛУЧ» при участии главного специалиста АО «НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха» Бадаляна Никиты Петросовича «24» февраля 2025 года, протокол заседания №193/04 от 24.02.2025 года.

Заключение

Диссертация Д.Б. Пушкина является законченным научным исследованием, выполненным автором самостоятельно на достаточно высоком научном уровне. Диссертация соответствует требованиям на соответствие ученой степени кандидата технических наук в том числе требованиям «Положения о порядке присуждения учёных степеней в НИТУ МИСИС». Полученные автором результаты обладают научной новизной и имеют существенное теоретическое и практическое значение, достоверны, выводы и заключения обоснованы. Обозначенная в диссертации цель достигнута, все поставленные задачи исследования решены. Положения, выносимые на защиту, экспериментально и теоретически обоснованы.

Автореферат полностью соответствует основному содержанию диссертации. Опубликованные по теме диссертации в полной мере отражают её сущность.

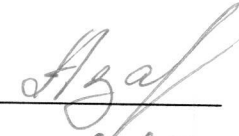
Соискателю, Пушкину Дмитрию Борисовичу, может быть присвоена степень кандидата технических наук по специальности 2.2.3 — «Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники» по результатам публичной защиты диссертации за новые научно обоснованные технические и технологические решения в области технологии создания

высокоэффективных оптических покрытий ближнего ИК диапазона, имеющие существенное значение для обеспечения технологической независимости Российской Федерации.

Сведения о ведущей организации

1	Полное наименование организации	Акционерное общество «Научно-исследовательский институт «Полюс» имени М.Ф. Стельмаха»
2	Сокращённое наименование организации	АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф.Стельмаха»
3	Ведомственная принадлежность	ГК «Ростех»
4	Место нахождения	РФ, 117342, г. Москва, ул. Введенского, д. 3, корп. 1
5	Почтовый адрес организации с указанием индекса	РФ, 117342, г. Москва, ул. Введенского, д. 3, корп. 1
6	Телефон с указанием кода города	+7 (495) 333 91 44
	Адрес электронной почты	bereg@niipolyus.ru
	Адрес официального сайта в сети «Интернет»	https://niipolyus.ru/

Начальник отдела № 480 НПК-470, к.ф.-м.н., доцент

Азарова В.В. 

Ученый секретарь, к.ф.-м.н., доцент

Кротов Ю.А. 

