

На правах рукописи
УДК 681.7.08

ПРОСОВСКИЙ Юрий Олегович

**СИСТЕМА ПРЯМОГО МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ
ТОЛЩИНЫ НАНОСИМЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ**

Специальность 2.2.6 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2025

Работа выполнена в АО «Обнинское научно-производственное предприятие «Технология» им. А.Г Ромашина», государственном научном центре Российской Федерации в лаборатории тонкопленочных покрытий и прецизионной оптики.

Научный руководитель: **Денисов Дмитрий Геннадьевич**
кандидат технических наук, доцент кафедры лазерных и оптико-электронные приборов и комплексов МГТУ им. Н.Э. Баумана, доцент

Официальные оппоненты: **Губанова Людмила Александровна**
доктор технических наук, профессор научно-образовательного центра фотоники и оптоинформатики ИТМО, профессор

Казаков Василий Иванович
кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения

Ведущая организация: **АО «НИИ НПО «Луч», г. Подольск**

Защита диссертации состоится «25» июня 2025 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.2.331.07 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 библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте по адресу www.bmstu.ru.

Ваш отзыв на автореферат диссертации в двух экземплярах, заверенных печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по адресу 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5 стр.1, МГТУ им. Н.Э. Баумана (НИУ).

Телефон для справок: +7 (499) 267-67-54.

Автореферат разослан «____» ____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.т.н.,
доцент



Д.Г. Денисов

Общая характеристика работы.

Существует ряд задач, таких как уплотнение передачи потока информации по оптоволокну, спектроскопия в области медицины, изделия специальной техники и др., которые требуют обеспечить выделение той или иной части оптического излучения из широкого спектрального диапазона. Одним из известных и проработанных практически в области современных оптических технологий решений на сегодняшний день является метод селекции оптического излучения с применением интерференционных оптических покрытий.

Подобные оптические конструкции интерференционных оптических светофильтров характеризуются высокой резкостью перехода и узкой шириной спектрального коэффициента пропускания; наличием в оптической конструкции тонких слоев и слоев с незначительным изменением спектрального коэффициента пропускания от слоя к слою.

Практическая реализация многослойных оптических конструкций высокой сложности (узкополосных интерференционных светофильтров с числом слоев 80-90) требует функционирование алгоритмов самокомпенсации ошибок нанесения слоев, что возможно только с применением систем прямого монохроматического контроля с высокими точностными характеристиками.

Таким образом на сегодняшний день в технологиях нанесения тонкослойных диэлектрических структур всё более актуальным становится вопрос создание и исследование новой системы прямого монохроматического контроля, обладающей одновременно высокой точностью измерения спектральной характеристики; большим отношением Сигнал/Шум, характеризующим высокую чувствительность системы контроля тонкослойных диэлектрических структур и высокой степенью монохроматизации излучения, необходимой для обеспечения работы алгоритмов самокомпенсации, позволяющий достичь заданную спектральную ширину и резкость перехода создаваемого интерференционного фильтра.

Данной группе характеристик в отдельности удовлетворяет ряд реализаций систем контроля зарубежного производства, представленных в Таблице 1, приведенной в тексте диссертации на с. 5.

Как можно видеть из Таблицы 1, наиболее приоритетной реализацией системы оптического контроля, для получения сложных оптических конструкций (с узкой спектральной шириной и тонкими слоями) является система OMS5100 (LAYBOLD OPTICS, Германия). Однако, данная система контроля поставляется только в составе полноценной вакуумной напылительной установки, и ее приобретение как отдельного устройства не представляется возможным. В то же время, в ряде случаев требуется не приобретение нового, а модернизация существующего оборудования для решения конкретных прикладных задач. Существующие на сегодняшний день реализации систем контроля как отдельных устройств не обладают всей совокупностью требуемых характеристик, позволяющих реализовывать сложные оптические конструкции. Кроме того, интеграция подобных систем в технологический процесс для его автоматизации является довольно сложной задачей.

Важно отметить, что в некоторых случаях в монохроматорах существующих систем контроля содержатся элементы и узлы преобразования оптического сигнала подверженные разъюстировкам и вибрациям в условиях производства, тогда как во

многих случаях необходимо детектировать малоинтенсивный сигнал при нанесении тонких слоёв контролируемых оптических конструкций. Наличие же монолитности конструкции монохроматора принципиально позволит избежать данных негативных факторов, позволив повысить как чувствительность, так и точность системы прямого монохроматического контроля в целом.

Таким образом, на основании представленной актуальности, **целью** диссертационной работы является разработка системы прямого монохроматического контроля толщины наносимого покрытия с применением монолитного монохроматора на основе узкополосного интерференционного многорезонаторного фильтра Фабри-Перо, позволяющей достичь заданной точности измерения спектральных характеристик и высоким динамическим диапазоном.

Для реализации поставленных целей в работе были решены следующие **научно-технические задачи**:

1. Проведен сравнительный анализ эксплуатационных характеристик современных систем контроля толщины наносимых оптических покрытий с целью обоснования актуальности использования системы прямого монохроматического контроля, создание которой обеспечит высокую чувствительность и низкую погрешность измерений толщин наносимых слоев, в том числе и тонких слоев конструкции оптических покрытий, толщина которых 5-10 нм

2. Предложена и реализована оригинальная математическая модель преобразования оптического излучения элементами созданного монолитного монохроматора, позволяющая оценить его потенциальные эксплуатационные характеристики для возможности реальных измерений толщин слоев конструкций оптических покрытий с минимальной погрешностью и высокой чувствительностью.

3. Разработан испытательный стенд и проведены испытания системы монохроматического контроля толщины наносимых покрытий для оценки ее эксплуатационных характеристик в производственных условиях.

4. Представлены результаты исследования монолитного монохроматора с интегрированным высокоточным узлом обработки сигнала на основе узкополосного интерференционного многорезонаторного фильтра Фабри-Перо на созданном испытательном стенде, позволяющем оценить чувствительность системы для проведения измерений тонкослойных конструкций оптических покрытий с минимальной погрешностью.

5. Проведена апробация разработанной системы прямого монохроматического контроля на вакуумной напылительной установке, позволяющая обеспечить измерения характеристик сложных конструкций узкополосных светофильтров с погрешностью не более 0,05%

Объектом исследования являются системы контроля толщины наносимых оптических покрытий.

Предметом исследования является система прямого монохроматического контроля толщины наносимых оптических покрытий

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались: теория оптического излучения; теория преобразования сигналов в оптико-

электронных приборах; методы численного моделирования и средства САПР; создание тонкопленочных диэлектрических структур.

Научная новизна:

1. Предложена оригинальная математическая модель прохождения и преобразования излучения с учетом элементов системы прямого оптического контроля.

2. Впервые разработана система оптического контроля толщины наносимых покрытий с применением монолитного монохроматора на основе узкополосного интерференционного многорезонаторного фильтра Фабри-Перо, обеспечивающая высокую чувствительность измерений сложных конструкций тонкослойных покрытий с минимальной погрешностью.

3. Исследовано влияние уникальных параметров монолитного интерференционного монохроматора на точностные характеристики системы контроля при регистрации малоинтенсивных сигналов, прошедшего тонкослойные диэлектрические структуры сложных оптических покрытий, предложены рекомендации по их получению на этапах численного моделирования.

4. Разработан макетный образец, позволяющий провести критический анализ и дать статистическую оценку погрешностям основных эксплуатационных характеристик системы контроля.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанная Математическая модель прохождения и преобразования оптического излучения, позволяет сформировать требования к проектным характеристикам системы прямого монохроматического контроля в обоснованном диапазоне спектральной ширины монохроматора от 0,8 нм до 3 нм.

2. Для обеспечения высоких точностных характеристик с относительной погрешностью 0,05%, отношение сигнал/шум разработанной системы прямого монохроматического контроля толщины наносимых оптических покрытий должно находиться на уровне 80 дБ.

3. Для практической реализации конструкций высокой сложности (с числом слоев 70-90) погрешность измерения коэффициента пропускания разработанной системы монохроматического контроля должна быть на уровне 0,05%.

4. Для обеспечения экспериментальных исследований на разработанном стенде, погрешность измерения спектрального коэффициента пропускания не должна превышать 0,04 %.

Практическая значимость:

1. Разработаны требования к элементной базе монохроматора, обеспечивающей требуемые чувствительность и точность измерения при использовании системы прямого монохроматического контроля толщины наносимых тонкослойных оптических покрытий.

2. На основе разработанной оригинальной математической модели созданы элементы монохроматора на базе интерференционного светофильтра, а также канал приема и обработки сигнала, обеспечивающие высокую чувствительность и низкую погрешность измерения системой относительно существующих аналогов.

3. Разработанный стенд, позволяет апробировать предложенный метод прямого монохроматического контроля толщины наносимых тонкослойных оптических покрытий, а также оптимизировать технологические характеристики системы, что позволит оперативно повысить ее эффективность в процессе эксплуатации.

4. Реализована система контроля толщины наносимых тонкослойных оптических покрытий, обеспечивающая создание сложного узкополосного светофильтра с погрешностью измерения спектральной характеристики $\pm 0,05\%$ и отношением сигнал-шум 80 дБ

Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается согласованностью теоретических положений и результатов экспериментальных исследований, полученных в производственных условиях.

Апробация работы. SPIE. Optical Metrology 2019 (г. Мюнхен, Германия); SPIE. Optical Metrology 2021 (г. Мюнхен, Германия); Функциональные и полимерные материалы для авиационного остекления 2021 (г. Москва, Россия); Лазеры в науке, технике, медицине 2022 (г. Москва, Россия); 29 всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «ВАКУУМНАЯ ТЕХНИКА и ТЕХНОЛОГИИ – 2022» (г. Санкт-Петербург, Россия); 20-я международная конференция по голограммии и прикладным оптическим технологиям «HOLOEXPO-23» (г. Сочи, Россия, 2023), 31 Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Вакуумная техника и технологии – 2024» (г. Санкт-Петербург, Россия, 2024г.), 35 международная научно-техническая конференция «Лазеры в науке, технике, медицине» (п. Джубга, Россия, 2024), 23 международная научно-техническая конференция «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов», (г. Обнинск, Россия, 2024г.).

Внедрение и использование результатов работы. Основные результаты диссертационной работы внедрены и применены на предприятии АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина (г. Обнинск) в лаборатории оптических покрытий и прецизионной оптики при выполнении НИР "Пирамида" для получения и исследовании тонких металлических пленок, используемых при разработке нового многофункционального покрытия для авиационного остекления из полимерных материалов, что подтверждается соответствующим актом внедрения.

Результаты диссертационной работы внедрены на предприятии ООО «ФЕРРИ-ВАТТ» (г. Казань) и используются для расчета конструкций оптических систем контроля, интегрированных в вакуумные напылительные установки при их непосредственном производстве, что подтверждается соответствующим актом внедрения.

Личный вклад автора. Автором была разработана и предложена оригинальная математическая модель прохождения и преобразования оптического излучения в электрический сигнал. На основании проведенного численного моделирования было исследовано влияние характеристик впервые созданного монолитного монохроматора на выходные характеристики сигнала (отношение сигнал/шум и точность измерения). При непосредственном участии автора создан уникальный монолитный монохроматор на основе интерференционного светофильтра, а также реализована система прямого монохроматического контроля

толщины наносимых оптических покрытий на производственной площадке АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина».

Публикации.

Основные результаты работы изложены в 17 научных работах, в том числе в 7 научных статьях: 3 входящих в перечень ВАК РФ, 4 в зарубежных научных изданиях, входящих в международную базу Scopus и Web of Science.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав и общих выводов, изложенных на 221 страницах машинописного текста, содержит 129 рисунков, 43 таблицы и список литературы из 100 наименований.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, проработана и представлена научная новизна и практическая значимость результатов. Изложены основные положения, выносимые на защиту, приводится список источников исследования и сведения об апробации работы.

В первой главе проведен сравнительный анализ ряда ключевых характеристик систем контроля толщины наносимых оптических покрытий. Были рассмотрены существующие реализации систем неоптического контроля, систем косвенного и прямого оптического контроля, а также варианты реализации широкополосного и монохроматического контролей. На основании проведенного сравнительного анализа характеристик существующих практических реализаций, основные характеристики систем контроля каждого указаны на Рисунке 1.18, приведенном в тексте диссертации на с. 37.

Анализ характеристик показывает, что наиболее предпочтительной реализацией является система и метод (на ее основе) прямого монохроматического контроля, так как она позволяет эффективно и с минимальной погрешностью проводить контроль сложных оптических конструкций.

Примеры типовых спектральных характеристик данных сложных оптических конструкций приведены на Рисунках 1 и 2.

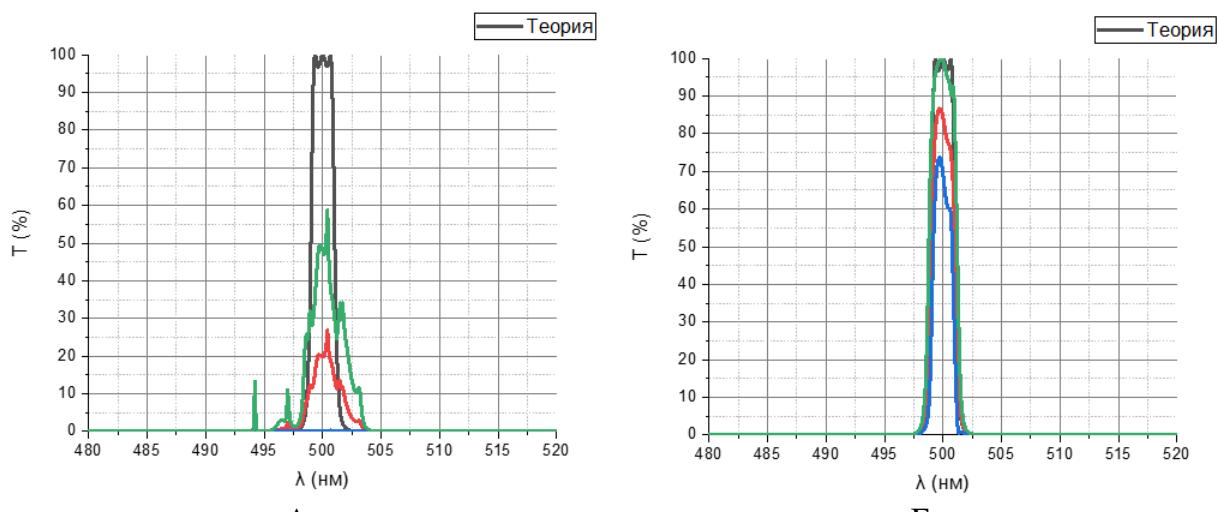


Рисунок 1 – Спектральная характеристика покрытия при погрешности нанесения слоев оптической конструкции на уровне 1-2%.

А – погрешность нанесения толщины слоев 2%; Б – погрешность нанесения толщины слоев 1%.

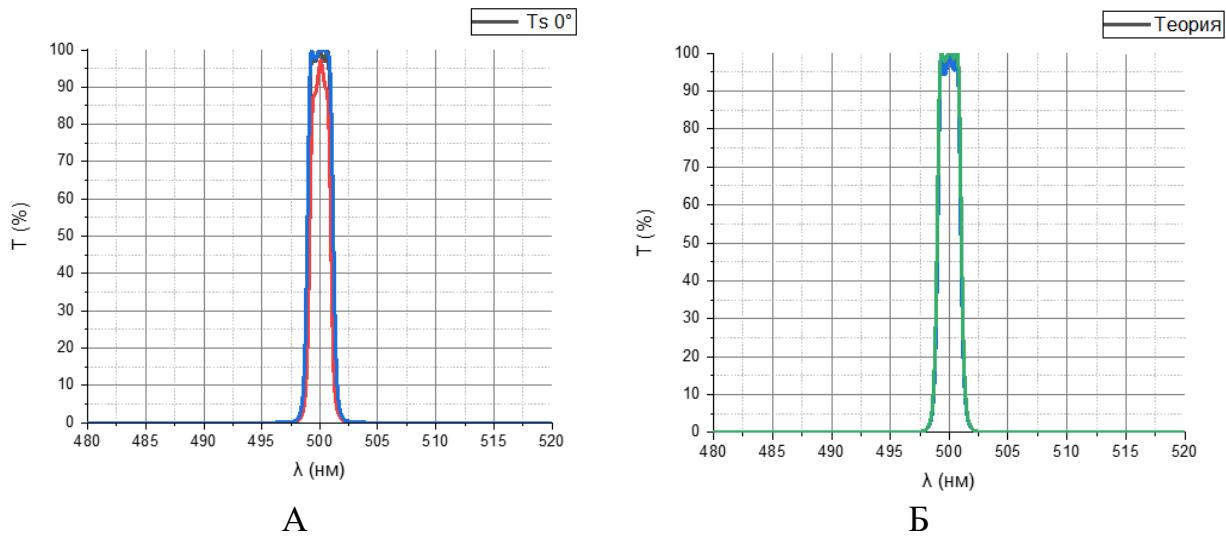


Рисунок 2 – Спектральная характеристика покрытия при погрешности нанесения слоев оптической конструкции на уровне 0,1-0,5%.

А – погрешность нанесения толщины слоя 0,5%; Б – погрешность нанесения толщины слоя 0,1%.

Как видно из рисунков 1 и 2, для успешного получения подобной оптической конструкции, необходимо обеспечить погрешность нанесения слоев оптической конструкции не более $\pm 0,5\%$. В результате численных расчётов в работе показано, что для достижения заданной точности нанесения слоя (Рисунок – 3), системе оптического контроля необходимо обеспечить погрешность измерения спектральной характеристики не хуже $0,05\%$.

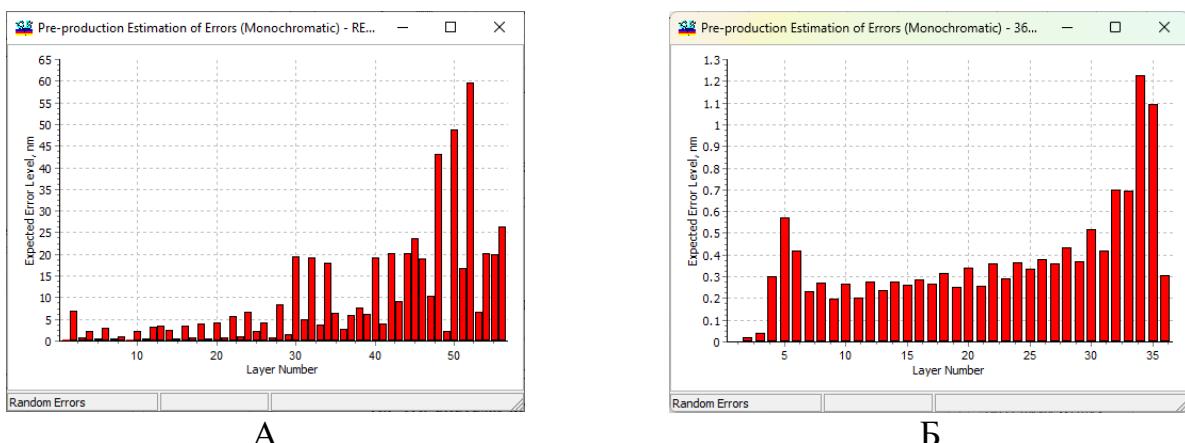


Рисунок 3 – Погрешность нанесения слоя оптической конструкции в зависимости от погрешности измерения спектральной характеристики.

А – Погрешность измерения спектральной характеристики $0,2\%$; Б – погрешность измерения спектральной характеристики $0,05\%$.

Для обеспечения максимальной точности измерения необходимо оценить адекватную спектральную ширину монохроматора. На Рисунке 4А показан реальный сигнал, представляющий собой некоторое теоретическое значение спектральной характеристики T_{th} и погрешность измерения $\pm \sigma_{meas}$. На Рисунке 4Б показано влияние спектральной ширины монохроматора на усреднение спектральной характеристики.

Сигнал регистрируется в виде:

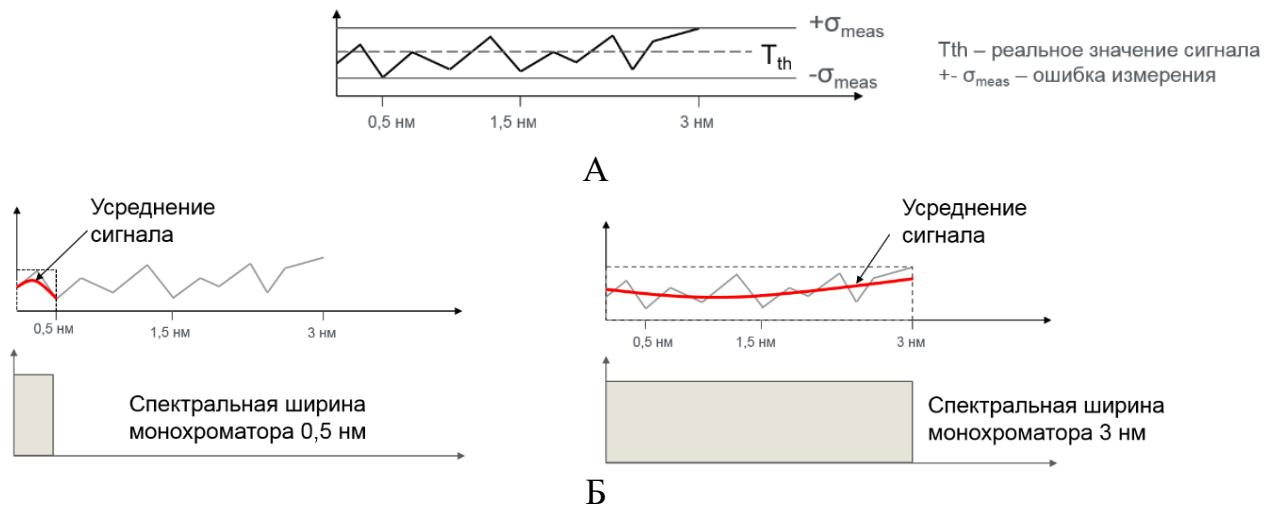


Рисунок 4 – Допустимые границы ширины монохроматора.

А – Графическое представление реального сигнала; Б – Влияние ширины монохроматора на усреднение сигнала.

Как видно из Рисунка 4 – в случае спектральной ширины монохроматора меньше 0,8 нм интенсивность полезного сигнала становится слишком малой, что приводит к потере чувствительности системы, а при ширине монохроматора свыше 3 нм происходит большое усреднение сигнала, что может привести к потере полезного значения. Таким образом, заданная точность измерения спектральной характеристики должна быть обеспечена при спектральной ширине монохроматора от 0,8 до 3 нм.

С этой целью во второй главе была разработана система контроля толщины наносимых оптических покрытий на основе монолитного интерференционного монохроматора, позволяющая, решать поставленные научные задачи при проектировании тонкопленочной оптической конструкции с обоснованной в первой главе спектральной ширине монохроматора от 0,8 до 3 нм.

Для этого были подробно проанализированы системы монохроматизации и приема излучения, с целью исследования их ключевых особенностей. На основании проведенного сравнительного анализа была предложена оригинальная математическая модель описания и преобразования оптического сигнала в системе контроля, позволившая впервые разработать конструкция собственного интерференционного монохроматора. Моделирование характеристик на основании данной модели позволило получить потенциальные характеристики системы.

Очевидно, что ключевым элементом монохроматического контроля является монохроматор. Для определения основных особенностей каждого из способов монохроматизации излучения, был проведен сравнительный анализ их основных характеристик. Были рассмотрены монохроматоры на дифракционных решетках, на призмах, акустооптические и монохроматоры на основе интерферометра Фабри-Перо. Результаты сравнительного анализа приведены на Рисунке 2.19, приведенном в тексте диссертации на с. 71.

Результаты проведенного исследования, показали, что каждый из рассмотренных методов имеет недостатки, ограничивающие возможности применения данных систем монохроматизации в качестве метода контроля

толщины наносимых оптических покрытий. Несмотря на то, что наилучший параметр монохроматизации излучения показывают монохроматоры на дифракционной решетке (чем и обусловлено наибольшее распространение среди всех типов монохроматоров), их ключевые недостатки ограничивают возможности применения в системах оптического контроля. Основными недостатками монохроматоров на дифракционных решетках являются крайне сложная настройка и юстировка, слабая вибрационная устойчивость, что негативным образом скажется на точности измерений при эксплуатации подобных систем на производстве, а также потери излучения в процессе прохождения через монохроматор (до 40%).

Поэтому, в данной работе **впервые предложена конструкция монолитного монохроматора**, обладающая степенью монохроматизации до 0,8 нм; отсутствием оптических aberrаций; спектральным коэффициентом пропускания до 90% и вибрационной устойчивостью на основе интерференционного светофильтра Фабри-Перо. Ключевым элементом разработанного монохроматора является многорезонаторный фильтр Фабри-Перо. Он представляет собой два интерференционных зеркала с оптической толщиной $= \lambda/4$, разделенных между собой слоем с оптической толщиной $\lambda/2$. Структурная схема данной оптической конструкции приведена на Рисунке 5.

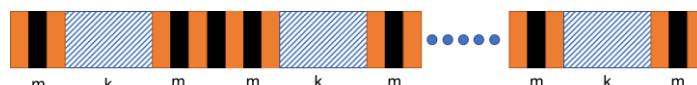


Рисунок 5 – Структурная схема оптической конструкции многорезонаторного фильтра Фабри-Перо.

Данная оптическая конструкция, согласно теории Телена, может быть представлена в виде теории эквивалентных слоев. В данном случае, оптическая конструкция многорезонаторного фильтра сводится к конструкции эквивалентного фильтра Фабри-Перо с эквивалентными слоями - N_1, N_2 (Рисунок 6).

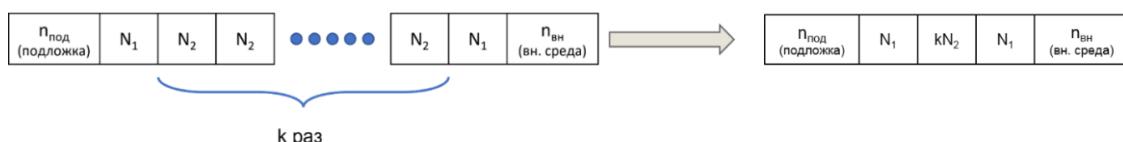


Рисунок 6 – Структурная схема эквивалентного фильтра Фабри-Перо.

Значение эквивалентного показателя преломления N зависит от числа пар слоев с высоким и низким показателями преломления и определяется согласно выражению:

$$N_1 = \frac{n_B^{m+1}}{n_H^m}; N_2 = \frac{n_B^{u+1}}{n_H^u}$$

Ключевыми параметрами любого монохроматора являются – спектральная ширина излучения (степень монохроматизации) и резкость перехода.

Спектральная ширина фильтра Фабри-Перо зависит только от числа слоев первого зеркала. Соответственно, для эквивалентного фильтра Фабри-Перо, число слоев эквивалентного зеркала N_1 и определяет спектральную ширину всей конструкции.

Резкость перехода является также важной характеристикой монохроматора. Очевидно, что чем более резким является переход, тем лучше происходит выделение спектра. Дело в том, что в случае малой резкости перехода результирующая спектральная характеристика будет представлять собой совокупность идеального «прямоугольного» сигнала (штриховка на рисунке 7А) и шумового сигнала, что отрицательно скажется на точности измерения. Для обеспечения требуемой резкости перехода, исходя из параметров фильтра по уровню пропускания $\Delta\lambda_p = 89,12\%$ и уровню подавления $\Delta\lambda_r = 0,1\%$ (Рисунок 7Б) определяется необходимое число резонаторов, согласно выражению:

$$T_q(S) \cong 100, \text{ где}$$

$$S = \frac{\Delta\lambda_r}{\Delta\lambda_p}; T_q(S) = 2ST_{q-1}(S) - T_{q-2}(S); T_0(S) = 1; T_1(S) = S.$$

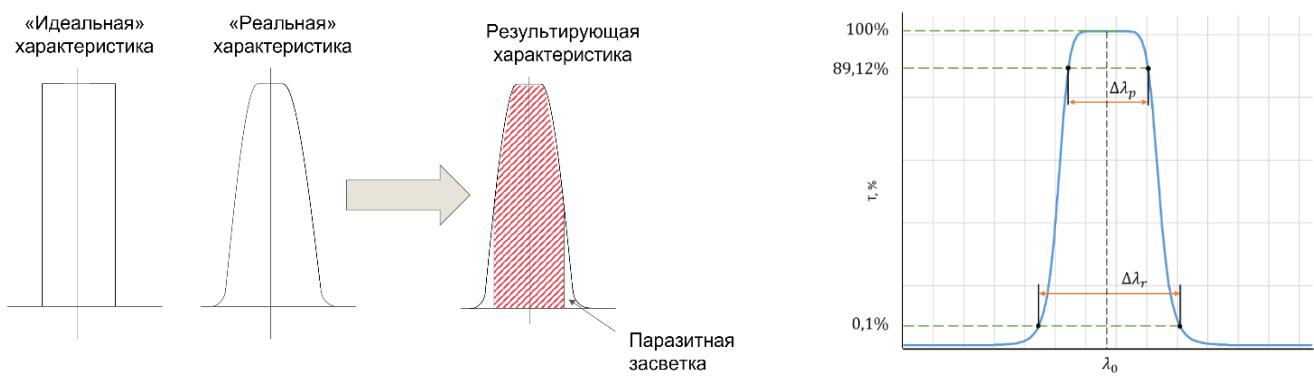


Рисунок 7 – Необходимость обеспечения максимальной резкости перехода.
А – Влияние резкости перехода на конечную спектральную характеристику
сигнала; Б – Ключевые характеристики монохроматора.

Однако, для формирования типовой конструкции монохроматора недостаточно получить максимальную резкость перехода. Важно обеспечить практическую воспроизводимость конструкции. В этом случае, оптимальная область ключевых характеристик типового фильтра монохроматора обозначена на Рисунке 8, что соответствует числу резонаторов от 2 до 5; числу слоев первого зеркала от 2 до 8 и резкости перехода 3. Число слоев оптической конструкции будет варьироваться от 30 до 80. Из практически обоснованной области оптимальных конструктивных значений был проведен анализ типовой спектральной характеристики, в ходе которого было выявлено, что проектирования одного многорезонаторного фильтра Фабри-Перо недостаточно, ввиду того что подавление не осуществляется во всем диапазоне работы метода монохроматического контроля. В результате, одиночный узкополосный светофильтр имеет множество «параизитных хвостов», которые будут приводить к появлению шумовой засветки приемника, что существенным образом повысит общий шум системы в целом. На Рисунке 9А приведена спектральная характеристика многорезонаторного фильтра

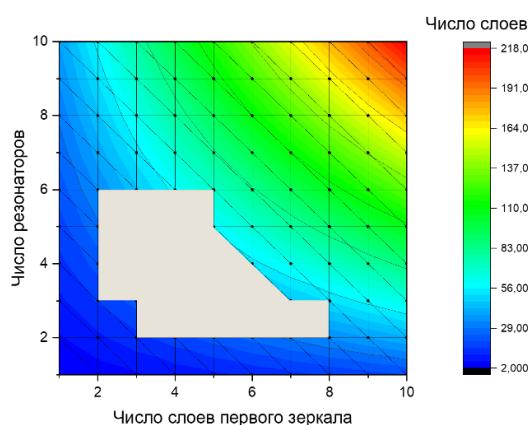


Рисунок 8 – Оптимальные параметры для многорезонаторного фильтра Фабри-Перо.

рабочего диапазона монохроматора обеспечивается подавление спектральной характеристики с оптической плотностью > 4 . Результатирующая спектральная характеристика приведена на рисунке 2.40Б, расположенная в тексте диссертации на с. 93.

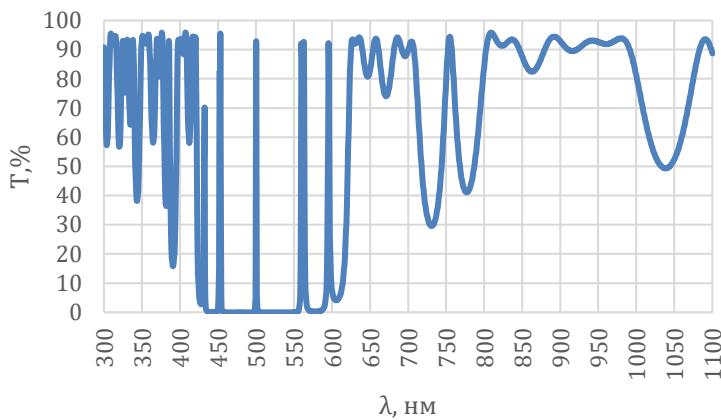
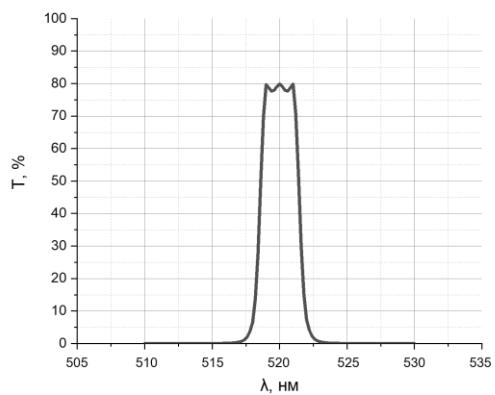


Рисунок 9 – Спектральная характеристика пропускания монохроматора.
А – спектральная характеристика без цветных стекол, Б – спектральная характеристика в области пропускания монохроматора.



А

Б

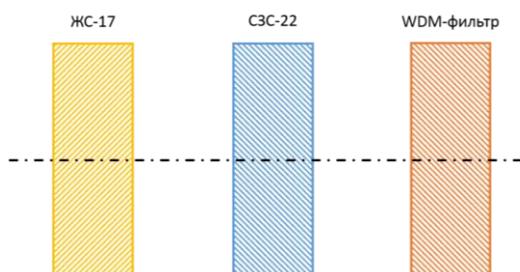


Рисунок 10 – структурная схема интерференционного монохроматора.

Фабри-Перо в диапазоне от 300 до 1100 нм. Для решения данной проблемы, был предусмотрен ряд технических решений, включающий в себя использование склейки цветных стекол из СЗС-22 и ЖС-17, позволяющих подавить излучение в диапазонах от 300 нм до 450 нм и от 550 нм до 1100 нм, что обусловлено физическими свойствами красителей, присутствующих в массе данных стекол. В результате, конечная спектральная характеристика в области пропускания приведена на Рисунке 9Б, а получившаяся структурная схема монохроматора приведена на Рисунке 10. При этом, вне

рабочего диапазона монохроматора обеспечивается подавление спектральной характеристики с оптической плотностью > 4 . Результатирующая спектральная характеристика приведена на рисунке 2.40Б, расположенная в тексте диссертации на с. 93.

Спроектированный монохроматор на основе многорезонаторного фильтра Фабри-Перо имеет ряд преимуществ перед другими существующими реализациями: простой конструкцией, полным отсутствием оптических aberrаций системы (ввиду того что все элементы являются плоскими) высокой виброустойчивостью, малыми габаритными размерами, простотой юстировки и интеграцией в напылительное оборудование.

В результате проведенного сравнительного анализа монохроматоров, исследования элементной базы приемников излучения и устройств преобразования фототока в электрический сигнал, а также разработанной конструкции монохроматора была разработана математическая модель, алгоритм которой представлен на Рисунке 11.

Алгоритм, преобразования излучения от ИИ до ПИ разработанной математической модели при помощи оператора А можно описать следующим выражением:

$$U(U_{\text{п}}, U_{\text{ш}}) = \Phi_0(P_{\text{ламп}}, \alpha, \Delta\lambda) * A(T_{\text{монохром}}, S, I_{\phi}, R_{\text{oc}}, G, I_{\text{ш}}, R_{\text{k}}, NG), \text{ где}$$

Φ_0 – поток излучения ИИ, $P_{\text{ламп}}$ – мощность ИИ; α – угол падения излучения на вход системы; $T_{\text{монохром}}$ – спектральные характеристики монохроматора; $\Delta\lambda$ – спектральная ширина монохроматора; S – спектральная чувствительность ПИ; I_{ϕ} – ток фотодиода; R_{oc} – сопротивление обратной связи в схеме преобразователя-усилителя сигнала; G – коэффициент усиления сигнала; $I_{\text{ш}}$ – шумовой ток (общий); R_{k} – сопротивление электронных компонент; NG – шумовое усиление сигнала.

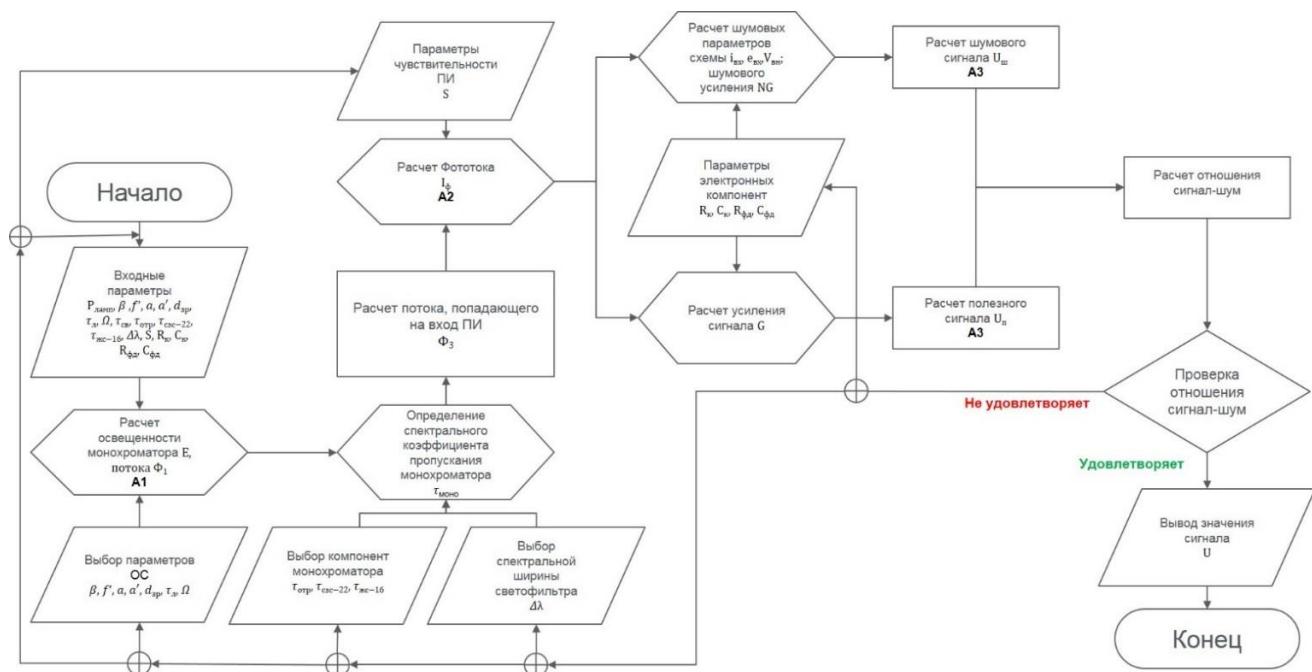


Рисунок 11 – Алгоритм предложенной математической модели.

Входные параметры и границы адекватности (применимости) математической модели приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Входные параметры и границы применимости математической модели.

Входные параметры модели	Границы применимости (адекватности) модели
Мощность потока излучения (мощность ИИ)	От 10 Вт до 50 Вт
Угол падения излучения	$0^\circ \pm 0,5^\circ$
Спектральная ширина монохроматора	От 0,8 нм до 3 нм

С учетом этого, на основании разработанной математической модели было проведено моделирование характеристик системы. Были промоделированы монохроматоры различной ширины и различные типы фотодиодов. Моделирование проводилось для спектральной ширины 0,8 нм, 1,5 нм, 2 нм и 3 нм. В ходе численного моделирования было исследовано влияние спектральной ширины монохроматора и параметров фотодиода на величину значений полезного сигнала и отношения сигнал-шум. Результаты моделирования потенциального отношения сигнал-шум указаны в Таблице 32, приведенной в тексте диссертации на с. 163; а значения потенциальной точности системы указаны в Таблице 33, приведенной в тексте диссертации на с. 164. Моделирование показало, что отношение потенциальное отношение сигнал-шум будет варьироваться в зависимости от типа приемника излучения и ширины монохроматора от 70, до 94 дБ; а потенциальная погрешность измерения – от 0,03% до 0,002%.

По результатам численного моделирования были получены графические зависимости сигнал-шум (Рисунок 12А) и уровня погрешности измерения спектральной характеристики (Рисунок 12Б) от спектральной ширины монохроматора.

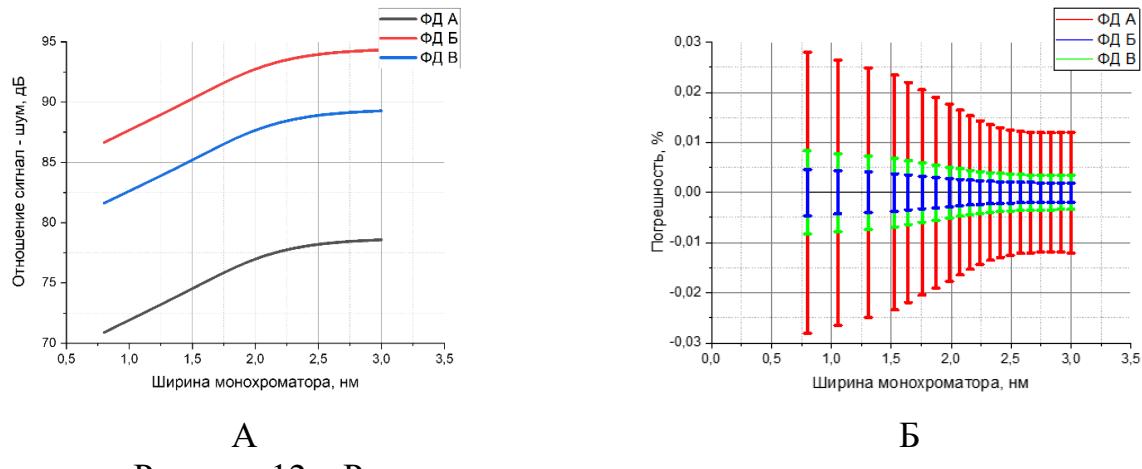


Рисунок 12 – Результаты численного моделирования.

А – Сравнительный анализ отношения сигнала-шум для ФД разных типов; Б – Сравнительный анализ погрешностей ФД разных типов

Как можно видеть из Рисунка 12, уменьшение спектральной ширины монохроматора приводит к снижению отношения сигнала-шум, а также к существенному увеличению погрешности сигнала. Важно отметить, что проведенное численное моделирование было проведено в **диапазоне адекватности математической модели**.

В результате проведенных во второй главе исследований были подробно проанализированы существующие методы монохроматизации излучения, рассмотрена элементная база приемников излучения, а также методы преобразования и усиления фототока в электрический сигнал. Была разработана математическая модель преобразования излучения, на основании которой было выполнено численное моделирование проектных характеристик разработанного метода монохроматического контроля. В результате моделирования, было установлено, что в зависимости от выбранного типа фотодиода и спектральной

ширины монохроматора, отношение сигнал-шум данного метода может варьироваться от 70 дБ до 92 дБ, а погрешность измерения от 0,002% до 0,03 %.

В третьей главе была проведена апробация системы, с учётом её полученных компонент, состоящая из трех этапов: апробация на испытательном стенде; апробация на отрезающих светофильтрах для оценки чувствительности системы и апробация на вакуумной напылительной установке.

На основе разработанной оригинальной математической модели были проанализированы эксплуатационные характеристики при помощи специально спроектированного стенда. Структурная схема стенда приведена на Рисунке 13.

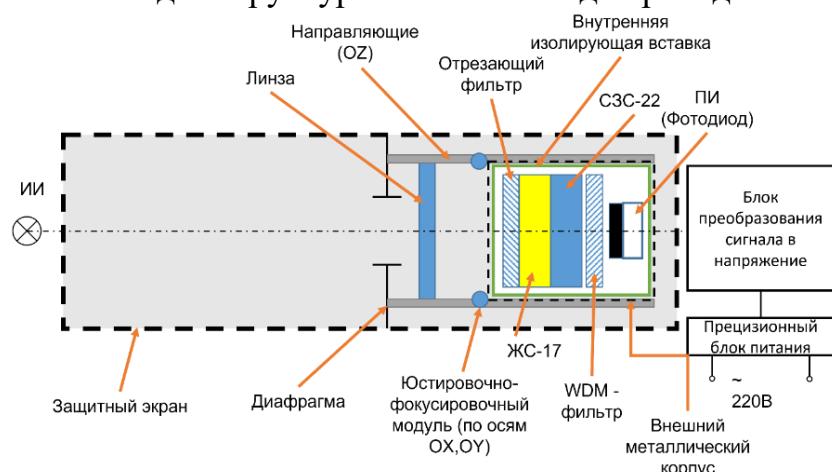
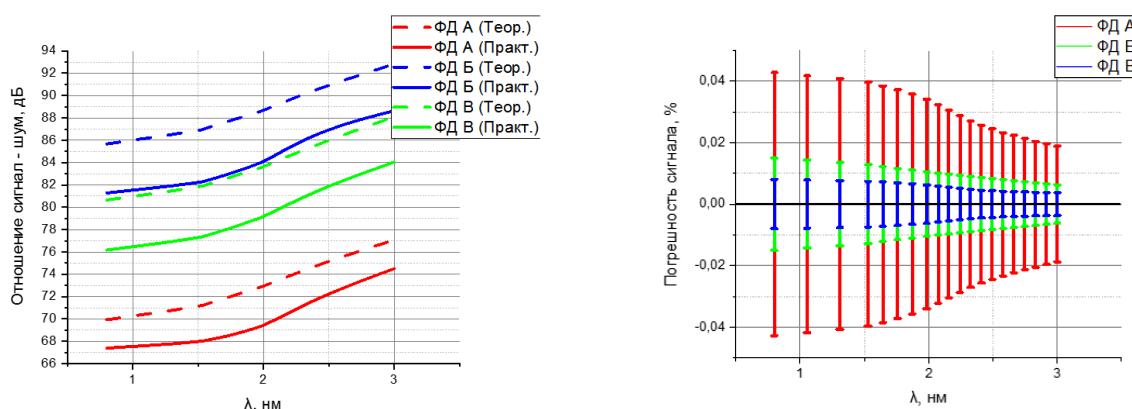


Рисунок 13 – Структурная схема испытательного стенда.

Анализ эксплуатационных характеристик различных реализаций систем контроля (монохроматоры с разной спектральной шириной) подтвердил зависимость значения сигнала-шум и погрешность измерения спектральной характеристики от ширины монохроматора. Графические результаты анализа приведены на Рисунке 14 (А, Б).



А

Б

Рисунок 14 – Результаты апробации на стенде.

А – Зависимость отношения С/Ш от спектральной ширины монохроматора;
Б – Зависимость погрешности сигнала от спектральной ширины монохроматора для разных типов фотодиодов

В результате проведенного экспериментального исследования различных реализаций на стенде, отношение сигнал шум составило от 67 дБ до 89 дБ для различных типов фотодиодов и спектральных ширин монохроматора, а погрешность измерения сигнала варьируется от $+0,004\%$ до $+0,04\%$, что очень близко к значениям, полученным в результате численного моделирования. Как можно видеть из Рисунков 14 (А, Б), качественное поведение зависимостей сохраняется, что непосредственным образом **верифицирует** предложенную математическую модель и подтверждает ее адекватность в заявленном диапазоне спектральной ширины монохроматора от 0,8 нм до 3 нм.

Вторым этапом апробации, выполненной в рамках третьей главы, стал анализ динамического диапазона (чувствительности системы). Для этой цели был подготовлен ряд отрезающих светофильтров и бесцветного стекла. Данные светофильтры последовательно измерялись на длине волны 497 нм на поверенном спектрофотометре Agilent Cary 300 (№ Свидетельства: С-БУ/01-10-2024/376642400 от 01.10.2024; Ссылка на протокол: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/cm/results/1-376642400>); существующей штатной системе прямого широкополосного контроля и на разработанной системе прямого монохроматического контроля. Характеристики тестовых отрезающих светофильтров и спектральные коэффициенты пропускания (полученные при помощи спектрофотометра) приведены ниже:

- Образец 1 – 22 слоя, $T = 0,016\%$
- Образец 2 – 12 слоев, $T = 1,694\%$
- Образец 3 – 4 слоя, $T = 55,92\%$
- Образец 4 – BorofloatSchott-33, $T = 92,68\%$

Спектральные характеристики тестовых образцов указаны на Рисунке 3.29, приведенном в тексте диссертации на с. 199, а результаты измерений в Таблице 2.

Таблица 2 – Результаты измерения тестовых образцов на различных реализациях систем контроля.

	$T, \%$ (спектрофотометр)	$T, \%$ (Система прямого широкополосного контроля)	Т, % (Система прямого монохроматического контроля)			
			Спектральная ширина монохроматора, нм			
			3	2	1,5	0,8
Образец 1	$0,016\% \pm 0,005\%$	$0\% \pm 0,1\%$	$0,021\% \pm 0,015\%$	$0,023\% \pm 0,025\%$	$0,025\% \pm 0,034\%$	$0,022\% \pm 0,05\%$
Образец 2	$1,694\% \pm 0,005\%$	$1,7\% \pm 0,1\%$	$1,698\% \pm 0,015\%$	$1,704\% \pm 0,025\%$	$1,690\% \pm 0,034\%$	$1,71\% \pm 0,05\%$
Образец 3	$55,92\% \pm 0,005\%$	$56,0\% \pm 0,1\%$	$55,930\% \pm 0,015\%$	$55,893\% \pm 0,025\%$	$55,910\% \pm 0,034\%$	$55,95\% \pm 0,05\%$
Образец 4	$92,696\% \pm 0,005\%$	$92,7\% \pm 0,1\%$	$92,707\% \pm 0,015\%$	$92,687\% \pm 0,025\%$	$92,691\% \pm 0,034\%$	$92,671\% \pm 0,05\%$

Из Таблицы 2 видно – при сверхмальных уровнях сигнала (менее 0,1%; образец 1) система прямого широкополосного контроля уже не способна зафиксировать сигнал, в то время как система монохроматического контроля данный уровень сигнала фиксирует столь малое значение интенсивности сигнала. Это подтверждает высокий динамический диапазон системы прямого монохроматического контроля. Данная чувствительность системы позволяет регистрировать сверхмалую толщину наносимых оптических покрытий: для оксида ниобия Nb_2O_5 система способна зарегистрировать толщину – 0,25 нм, а для оксида кремния SiO_2 – 0,4 нм.

На основании второго этапа апробации, можно сделать следующий вывод: разработанная система прямого монохроматического контроля имеет более высокую чувствительность сигнала, что крайне важно при нанесении сложных оптических конструкций. Кроме того, более низкая (на порядок) погрешность измерений также является весомым преимуществом данной системы. Совокупность данных характеристик позволяет существенно повысить точность нанесения тонких слоев оптической конструкции.

В рамках третьего этапа апробации, была проведена апробация на вакуумной напылительной установке ВАК-760. В рамках данного этапа апробации были получены интерференционные светофильтры на разных монохроматорах. Были выбраны граничные реализации систем в диапазоне спектральной ширины от 0,8 до 3 нм. В первом случае, была использована система контроля со следующими характеристиками:

- Ширина монохроматора – 3 нм
- Погрешность измерения – +-0,015%
- Отношение сигнал/шум – 88 дБ

При использовании данной системы контроля был получен интерференционный светофильтр, с центральной длиной волны 520 нм. Его спектральная ширина составила 10 нм, а общее число слоев – 61. Спектральная характеристика подобного светофильтра приведена на рисунке 15А.

Во втором случае использовался монохроматор со спектральной шириной 0,8 нм. Его характеристики следующие:

- Погрешность измерения – +-0,05%
- Отношение сигнал/шум – 80 дБ

С ее помощью был получен интерференционный светофильтр с центральной длиной волны 635 нм, спектральной шириной 10 нм и с общим числом слоев оптической конструкции – 61. Его спектральная характеристика приведена на Рисунке 15Б.

Из Рисунка 15 видно – в случае использования второй реализации, погрешность измерения спектральной характеристики которой составляет +- 0,05% и равна, по сути, предельной погрешности измерения, при которой возможно получение данного типа оптической конструкции, спектральная характеристика светофильтра имеет провал вблизи центральной длины волны. Дальнейшее увеличение погрешности будет только ухудшать конечную спектральную характеристику. В случае применения реализации со спектральной шириной 3 нм и погрешностью измерения +- 0,015% - спектральная характеристика пропускания близка к теоретическому расчету.

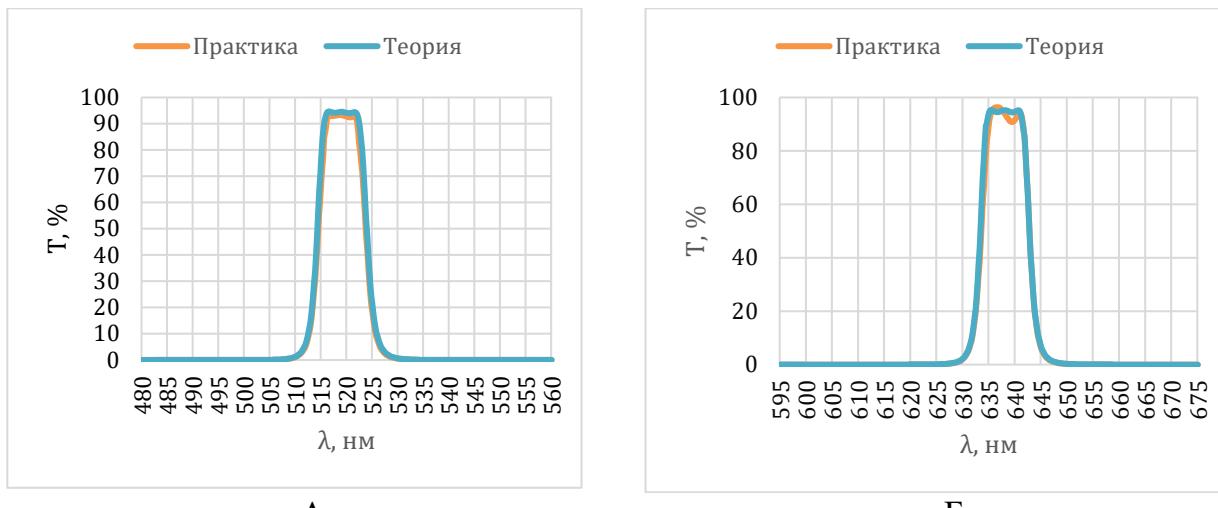


Рисунок 15 – Спектральная характеристика светофильтра, полученная при помощи двух различных реализаций систем контроля.

А – Спектральная характеристика светофильтра, полученная при помощи системы контроля с погрешностью измерения $+ - 0,015\%$; Б – Спектральная характеристика светофильтра, полученная при помощи системы контроля с погрешностью измерения $+ - 0,05\%$.

Основные результаты диссертации

В результате выполненных исследований был решен комплекс научных и инженерных задач, направленных на разработку системы прямого монохроматического контроля толщины наносимых оптических покрытий. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Разработана система прямого монохроматического контроля толщины наносимого покрытия с применением монолитного монохроматора на основе узкополосного интерференционного многорезонаторного фильтра Фабри-Перо, имеющая высокую точность измерения.
2. Проведен сравнительный анализ эксплуатационных характеристик существующих типов современных систем контроля толщины наносимых оптических покрытий, позволяющий обосновать структуру перспективной системы прямого монохроматического контроля, обеспечивающей более высокое (относительно существующих систем) отношение сигнал-шум (на уровне 80 дБ), а также более низкую погрешность измерения коэффициента пропускания на уровне не более 0,05%.
3. Разработана оригинальная математическая модель преобразования оптического излучения компонентами монохроматора с обоснованными функциональными характеристиками математической модели, а также проведено ее численное моделирование. По результатам моделирования было установлено, что теоретическое отношение сигнал-шум составляет от 70 дБ до 95 дБ, а погрешность измерения спектрального коэффициента пропускания составляет от $+ - 0,002\%$ до $+ - 0,03\%$.

4. Разработан испытательный стенд, на котором проведены полунатурные испытания созданных реализаций макетных образцов, а также проведена оценка влияния их эксплуатационных характеристик на конечное отношение сигнал-шум в производственных условиях.

5. Представлены результаты исследования монолитного монохроматора с интегрированным высокоточным узлом обработки сигнала на основе узкополосного интерференционного многорезонаторного фильтра Фабри-Перо на созданном испытательном стенде. Погрешность измерения спектральной характеристики составила от +0,004% до +0,04%, а отношение сигнал-шум от 67дБ до 88 дБ.

6. Проведена апробация разработанной системы на вакуумной напылительной установке, по результатам которой были получены различные реализации сложных оптических конструкций интерференционных светофильтров. Погрешность измерения созданных реализаций систем монохроматического контроля составила от 0,015% до 0,05%.

Основные результаты диссертации изложены в следующих работах:

1. Direct monochromatic optic control system of the thickness of thin-film interference coatings applied in vacuum / Yu. O. Prosovskii [et. al] // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering: Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XI, Vol. 11056. Munich: SPIE, 2019. P. 110563Z. DOI: 10.1117/12.2525853.

2. Contemporary system of direct broadband optical monitoring of thickness of spray optical coatings / Yu.O. Prosovsky [et. al.] // Light & Engineering. 2020. Vol. 28. №4. P. 48 – 52. DOI: 10.33383/2020-017.

3. Исследование влияния качества поверхностей оптических подложек на эксплуатационные характеристики тонкопленочных покрытий / Ю. О. Просовский [и др.] // Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8, № 4. С. 282 – 291.

4. Structural changes in niobium oxide during electron beam evaporation / Y. O. Prosovskii [et al.] // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2021. P. 117830O. DOI: 10.1117/12.2592259.

5. Investigation of the Influence of the Quality of Surfaces of Optical Substrates on the Performance Characteristics of Thin-Film Coatings / Yu. O. Prosovskii [et. al.] // Journal of Communications Technology and Electronics. 2023. Vol. 68, No. 9. P. 1053 – 1060. DOI: 10.1134/s1064226923090061.

6. Создание современной высокоточной бюджетной системы прямого монохроматического контроля толщины наносимых оптических покрытий / Ю. О. Просовский [и др.] // Контентант. 2024. Т. 23, №4. С. 58–71.

7. Разработка математической модели системы прямого монохроматического контроля на основе монохроматора с применением многорезонаторного фильтра Фабри-Перо и ее апробация на экспериментальном стенде / Ю. О. Просовский [и др.] // Контентант. 2024. Т. 23, №4. С. 41–57.