

На правах рукописи



Семенов Захар Владимирович

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА НЕПРЯМОГО ОПТИЧЕСКОГО
КОНТРОЛЯ ТОЛЩИН МНОГОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ
В ШИРОКОМ СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ**

Специальность 05.11.07 –

Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Новосибирск – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт автоматки и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

Научный руководитель: доктор технических наук
Лабусов Владимир Александрович

Официальные оппоненты: **Чугуй Юрий Васильевич**,
доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Конструкторско-технологический
институт научного приборостроения Сибирского
отделения Российской академии наук, дирекция,
научный руководитель Института, г. Новосибирск;

Шаяпов Владимир Равильевич,
кандидат физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт неорганической
химии им. А.В. Николаева Сибирского отделения
Российской академии наук, лаборатория
функциональных плёнок и покрытий,
старший научный сотрудник, г. Новосибирск

Ведущая организация: Акционерное общество «Государственный
оптический институт имени С.И. Вавилова»,
г. Санкт-Петербург

Защита состоится 24 декабря 2019 года в 10:00 часов в конференц-зале на заседании диссертационного совета Д 212.173.08 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, проспект Карла Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте www.nstu.ru.

Автореферат разослан «___» ноября 2019 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук,
доцент



Максим Андреевич Степанов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертации

В настоящее время при создании оптических элементов широко используются многослойные тонкоплёночные диэлектрические структуры: просветляющие покрытия, дихроичные и широкополосные зеркала, светоделители, узкополосные и другие фильтры. Они изготавливаются путём нанесения на подложки в вакуумной камере последовательности слоёв с различными толщинами и показателями преломления. При прохождении через такое покрытие излучение на границах сред слоёв частично отражается и преломляется, в результате чего внутри слоёв, а также в отражённом и прошедшем излучении, происходит многолучевая интерференция. Выбрав значения толщин и показателей преломления слоёв на этапе проектирования многослойного покрытия, можно создать оптический фильтр с требуемыми спектрами отражения и пропускания. Зачастую необходимо наносить десятки слоёв с характерными физическими толщинами от единиц нанометров до нескольких микрометров с погрешностями толщины слоя порядка одного нанометра и менее. Быстрое развитие способов нанесения многослойных покрытий и совершенствование технического оснащения вакуумных установок привели к тому, что создание многослойных покрытий происходит с высоким уровнем однородности нанесения материала, а качество получаемых покрытий во многом определяется возможностью определения системой контроля текущей толщины слоя и момента остановки нанесения материала.

Среди существующих методов контроля нанесения (резонансных, магнитных, микрометрических, оптических и других) для большинства задач создания оптических фильтров наиболее точными и надёжными являются методы *оптического (спектрального)* контроля, которые заключаются в том, что на плоскую контрольную подложку с наносимым покрытием падает излучение от источника, а прошедшее или отражённое от неё излучение регистрируется и анализируется. Оптический контроль может проводиться на одной длине волны (монокроматический контроль), на нескольких длинах волн и в широком спектральном диапазоне (*широкополосный* контроль). Наиболее информативным и точным вариантом оптического контроля является метод широкополосного контроля, пионерские работы по которому представил Б. Видаль в конце 70-х годов.

Появление доступных спектрометров с многоэлементными фотоприёмниками позволило измерять на вакуумных установках спектры отражения и пропускания с несколькими тысячами точек одновременно в реальном времени, что дало толчок развитию и применению методов широкополосного контроля. Различными авторами за последние 15 лет была показана эффективность и перспективность данного метода контроля для изготовления различных видов оптических покрытий. Зарубежные производители вакуумных установок внедряют системы широкополосного спектрального контроля в свои решения, и данный метод активно развивается в Германии, США, Японии, Китае, Беларуси и других странах.

Рост вычислительных мощностей компьютерных систем позволил не только проводить регистрацию спектров в процессе нанесения слоёв сотни раз в секунду, но и математически обрабатывать эти данные. А. В. Тихонравов в 1982 году

предложил метод проектирования (синтеза) покрытий, основанный на нелокальной оптимизации с помощью игольчатой вариации («needle optimization»), получивший широкое распространение в проектировании оптических покрытий и в настоящее время являющийся одним из наиболее эффективных инструментов для синтеза покрытий. Этот и другие алгоритмы легли в основу коммерческого пакета «OptiLayer», позволяющего численно решать прямые и обратные задачи многослойных покрытий на современных персональных компьютерах. Применение автоматического решения таких задач в системе контроля позволит определять толщину наносимых слоёв в реальном времени в процессе нанесения (*in situ*) и останавливать нанесение при достижении нужной толщины с погрешностью менее 0,1 нм усреднённой оптической толщины слоя, что точнее, чем у подавляющего большинства методов контроля. Кроме того, применение такого численного расчёта в процессе нанесения позволит определять *скорость нанесения* материала, стабилизация которой приведёт к улучшению качества получаемых спектральных фильтров из-за повышения однородности слоёв.

Развитие широкополосного контроля позволило появиться новому методу *непрямого широкополосного* контроля. Метод непрямого контроля основан на том, что для контроля используются дополнительные контрольные подложки с конфигурацией наносимых слоёв, отличной от создаваемого рабочего покрытия. Первая научная работа с применением данного метода опубликована коллективом В. Г. Жупанова в 2009 году. Одновременно с этим данный метод применялся Г. В. Эргом для создания многослойных покрытий на вакуумных установках Института лазерной физики (ИЛФ СО РАН).

Из-за того, что метод непрямого широкополосного контроля известен менее десяти лет, в научной литературе ощущается недостаток информации о нём, что является упущением, поскольку данный метод является универсальным и перспективным. Данный метод позволяет создавать многослойные покрытия с погрешностями, которые не зависят от спектральных характеристик создаваемого фильтра. Это обусловлено тем, что при непрямом контроле спектры отражения и пропускания контрольных подложек с наносимым слоем почти не зависят от спектров отражения и пропускания рабочих подложек с создаваемым покрытием. Исследованию широкополосного контроля с использованием численного решения обратных задач в реальном времени посвящено ещё меньше научных работ, а на момент постановки данной работы они отсутствовали.

У метода непрямого широкополосного контроля есть и некоторые недостатки. Так, существует проблема определения толщин достаточно тонких (единицы и десятки нанометров) стартовых слоёв. Под стартовыми слоями понимаются слои, наносимые первыми на контрольную подложку. Погрешности измерения толщин таких слоёв могут быть существенно выше, чем для последующих, из-за отсутствия экстремумов и точек перегиба в анализируемых спектрах отражения и пропускания. Устранение данного недостатка существующего метода непрямого широкополосного контроля позволит улучшить его – сделать ещё более универсальным и точным, а получаемые покрытия более качественными.

Таким образом, учитывая новизну, высокую точность, универсальность и перспективность метода непрямого широкополосного контроля, а также

открывшиеся возможности регистрации спектров и численной обработки больших объёмов спектральных данных в реальном времени для определения толщины слоя и скорости его нанесения, исследование метода непрямого широкополосного контроля нанесения многослойных покрытий с использованием численного решения в реальном времени обратных задач для снижения погрешностей измерения толщин наносимых слоёв и создание опытного образца системы контроля на его основе является **актуальной задачей**.

Цели и задачи диссертации

Цель настоящей диссертации – исследование метода непрямого широкополосного контроля нанесения многослойных покрытий с использованием численного решения в реальном времени обратных задач для снижения погрешностей измерения толщин наносимых слоёв и создание опытного образца системы контроля на его основе. Под обратной задачей понимается вычисление толщин слоёв покрытия по его спектрам отражения или пропускания.

Для достижения данной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Обосновать выбор непрямого широкополосного контроля нанесения многослойных покрытий, как универсального и перспективного метода повышения точности измерения толщин слоёв.
2. Разработать компьютерную модель системы широкополосного контроля, позволяющую проводить исследование влияния характеристик её основных элементов (линейки фотодетекторов, спектрометра и источника излучения) на уровень случайных и систематических погрешностей измерения толщин слоёв.
3. Путём компьютерного моделирования исследовать влияние шумов линейки фотодетекторов, спектрального диапазона контроля, количества фотодетекторов, погрешности градуировки спектрометра по длинам волн, дрейфа интенсивности источника излучения и погрешности показателей преломления наносимых материалов на погрешности измерения толщин наносимых слоёв.
4. Разработать способ измерения толщин тонких (порядка единиц нм) стартовых слоёв с погрешностью, не превышающей погрешности измерения последующих слоёв покрытия.
5. Создать опытный образец системы контроля. Сравнить характеристики созданной системы с характеристиками известных решений, работающих в широком спектральном диапазоне. Сравнить характеристики спектральных фильтров, получаемых с использованием данной системы контроля, с характеристиками аналогов, производимых с помощью отечественных и зарубежных вакуумных установок.

Степень обоснованности результатов диссертации

Результаты диссертации подтверждены положительным опытом применения созданной системы контроля в составе вакуумной установки «ВУ-2М» Института лазерной физики (ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск) и высокими характеристиками спектральных фильтров, получаемых с её помощью (просветляющих покрытий, дихроичных и широкополосных зеркал, светоделителей и других), которые не уступают характеристикам фильтров, производимых с помощью лучших

отечественных и зарубежных вакуумных установок.

С помощью данной системы контроля нанесены высокоэффективные просветляющие покрытия для видимого диапазона излучения, которые использованы Новосибирским приборостроительным заводом с целью повышения коэффициента светопропускания прицела (изделие ПО525) в этом диапазоне до 91,5 %, что соответствует по данному параметру лучшим зарубежным аналогам. В работе показано, что данное покрытие по совокупности таких параметров, как спектральный диапазон, уровень среднего и максимального коэффициентов отражения, превосходит доступные решения для схожего спектрального диапазона, предлагаемые ведущими производителями просветляющих покрытий: AccuCoat (США), TSP (США), WTS Photonics CO (Китай), NHV Technologies (Индия; США; Великобритания) и другими.

Научная новизна

Новыми результатами диссертации являются:

1. Компьютерная модель системы непрямого широкополосного контроля, которая в отличие от известных позволяет исследовать влияние шумов линейки фотодетекторов, спектрального диапазона контроля, количества фотодетекторов, погрешности градуировки спектрометра по длинам волн, дрейфа интенсивности источника излучения и погрешности показателей преломления наносимых материалов на случайные и систематические погрешности измерения толщин слоёв.
2. Путём компьютерного моделирования впервые проведено исследование влияния характеристик элементов системы непрямого широкополосного контроля на погрешности измерения толщин слоёв. Обнаружено существование диапазона оптимальных толщин слоя, при которых достигаются наименьшие погрешности измерения. При больших толщинах наблюдается высокая погрешность, обусловленная погрешностью градуировки спектрометра по длинам волн, а при меньших – дрейфом интенсивности источника излучения и погрешностью показателя преломления. Для разрабатываемой системы контроля оптимальным является диапазон физических толщин 300 – 2400 нм для материала TiO_2 на подложке BK7 и 800 – 2200 нм для SiO_2 на LASF-01.
3. Предложен новый метод контроля многослойных покрытий с предварительно нанесённым слоем (слоями), который позволяет в 2 – 5 раз снизить погрешности измерения для стартовых слоёв с толщинами менее 100 – 250 нм (в зависимости от материала). Новизна предложенного метода подтверждена патентом РФ на способ.
4. Предложено и экспериментально апробировано физико-техническое решение системы контроля, которое в отличие от известных решений позволяет вести не прямой широкополосный контроль нанесения слоёв по спектрам отражения с определением толщины слоёв, скорости их нанесения и момента остановки путём численного решения обратной задачи многослойных покрытий в реальном времени.

Новизна результатов подтверждена приоритетными научными публикациями, патентом РФ и свидетельствами на программное обеспечение.

Практическая ценность и реализация результатов работы

Физико-технические решения, разработанные при создании системы спектрального контроля многослойных оптических покрытий и проведении компьютерного моделирования, включая метод непрямого широкополосного контроля толщин тонких стартовых слоёв покрытия с применением предварительно нанесённого слоя, составляют новый арсенал технических и измерительных средств для инженерных применений в области создания многослойных оптических покрытий.

По результатам исследования, проведённого с помощью компьютерного моделирования, сделаны выводы о влиянии характеристик элементов системы контроля и параметров нанесения на случайные и систематические погрешности измерения толщин наносимых слоёв и даны рекомендации для снижения этих погрешностей при использовании метода непрямого широкополосного контроля.

Разработанная система контроля была введена в состав вакуумной установки «ВУ-2М» Института лазерной физики (ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск), на которой были изготовлены такие виды спектральных фильтров, как просветляющие покрытия, дихроичные и широкополосные зеркала и другие. В том числе были изготовлены покрытия для спектральных областей, не пересекающихся со спектральным диапазоном контроля, например, зеркала для инфракрасного диапазона 2600 – 3400 нм. В таких случаях основным требованием для проведения контроля являлась достаточная прозрачность используемых материалов в диапазоне контроля.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Компьютерная модель системы широкополосного контроля, учитывающая такие характеристики элементов системы, как шумы линейки фотодетекторов, рабочий спектральный диапазон, количество фотодетекторов, погрешность градуировки спектрометра по длинам волн, дрейф интенсивности источника излучения, а также погрешность показателей преломления наносимых материалов, позволяет оценивать минимальный уровень случайных и систематических погрешностей контроля.
2. Существует диапазон толщин слоёв на контрольной подложке, который позволяет получить минимальную погрешность измерения толщин наносимых слоёв с использованием метода непрямого широкополосного контроля с решением обратных задач. При больших толщинах наблюдается высокая погрешность, обусловленная погрешностью градуировки спектрометра по длинам волн, а при меньших – дрейфом интенсивности источника излучения и погрешностью показателя преломления. Диапазон оптимальных толщин зависит от материала слоя, подложки и характеристик элементов системы контроля и параметров нанесения.
3. Метод непрямого спектрального контроля по дополнительным контрольным подложкам, содержащим вспомогательный предварительно нанесённый слой (или слои) материала, позволяет измерять толщины тонких стартовых слоёв покрытия с погрешностью, не превышающей погрешности измерения последующих слоёв покрытия.

4. Использование численного решения обратной задачи многослойных покрытий в реальном времени в ходе нанесения слоя позволяет измерять его толщину и скорость его нанесения, а также поддерживать скорость нанесения материала постоянной путём изменения мощности испарителя вакуумной установки, что приводит к повышению однородности получаемых плёнок.

Личный вклад автора

Автором поставлена задача исследования влияния характеристик элементов системы контроля и параметров нанесения на погрешности измерения толщин слоёв. Для решения данной задачи предложена компьютерная модель системы контроля и разработано программное обеспечение, с помощью которых проведено исследование и обработка полученных данных. На основании результатов исследования автором предложены способы снижения погрешностей измерения толщины наносимого слоя при использовании метода непрямого оптического контроля в вакуумных установках.

При непосредственном участии автора создано, испытано и внедрено техническое решение системы контроля. На программное обеспечение для управления разработанной системой контроля и проведения компьютерного моделирования оформлены авторские свидетельства, кроме того, автор является одним из заявителей патента на новый метод контроля многослойных покрытий с предварительно нанесённым слоем.

Апробация работы

Результаты диссертации рассматривались на семинаре «Современные подходы к созданию высококачественных оптических покрытий» (г. Москва, ВЦ МГУ, НП «НЦТП», 2013 г.), девятнадцатой научно-технической конференции «Фотометрия и её метрологическое обеспечение» (г. Москва, Росстандарт ВНИИОФИ, 2013 г.), международном научном конгрессе «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» (г. Новосибирск, СГУГиТ, 2018 г.), конференции «Фотоника и оптические технологии» (г. Новосибирск, 2010 г.), X, XI, XII международных симпозиумах «Применение анализаторов МАЭС в промышленности» (г. Новосибирск, 2009-2012 гг.), студенческой конференции «Оптика и Фотоника» (г. Новосибирск, 2008 г.).

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 11 научных работах, из которых 3 статьи в журналах, входящих в Перечень ВАК РФ (2 публикации входят в реферативные базы Scopus и Web of Science), 1 патент РФ на способ измерения, 2 свидетельства РФ на программное обеспечение, 5 статей в сборниках трудов конференций.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 125 наименований, 3 приложений. Объём текста диссертации составляет 157 страниц, в том числе 45 рисунков и 4 таблицы. Рисунки, таблицы и формулы имеют сквозную нумерацию.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, определены цель и задачи диссертации, новизна и практическая значимость полученных результатов, а также сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе, имеющей обзорный характер, дано обоснование выбора непрямого широкополосного контроля нанесения многослойных оптических покрытий, как универсального и перспективного метода повышения точности измерения толщин слоёв. Для этого проведено сравнение оптических и неоптических методов контроля (по времени нанесения, с помощью кварцевого датчика и других), приведены их основные достоинства и недостатки.

При сравнении оптических методов рассмотрены способы контроля по спектрам пропускания и отражения. Показано, что, несмотря на более сложную реализацию, контроль по спектрам отражения позволяет более эффективно использовать динамический диапазон спектрометра, что приводит к увеличению отношения сигнал/шум в регистрируемых спектрах. Этот вывод применим для измерения толщины одиночных слоёв, что особенно актуально для непрямого контроля, и для конфигураций слоёв просветляющих покрытий, которые на данный момент являются самым распространённым видом спектральных фильтров.

Рассмотрены методы оптического контроля на одной длине волны (монохроматический), на нескольких длинах волн и в широком спектральном диапазоне. Широкополосный контроль более сложный в реализации, но, благодаря большому количеству точек в регистрируемых спектрах, позволяет снизить погрешности измерения толщин слоёв, увеличить наглядность и достоверность контроля.

Кроме того, описаны методы прямого и непрямого контроля, показаны их преимущества и недостатки. При прямом контроле используется одна контрольная подложка, открытая для нанесения материалов в ходе всего процесса создания покрытия, в результате чего многослойные покрытия на контрольной и рабочих подложках совпадают. Недостатком такого метода является существенная зависимость погрешности измерения толщин слоёв от спектральных характеристик создаваемого покрытия. Более универсальным является метод непрямого контроля по двум и более контрольным подложкам, которые доступны для нанесения материала поочерёдно, в результате чего на каждую из них наносится своя конфигурация слоёв (в простейшем случае – слой из одного материала). Так, на Рисунке 1 представлена схема разбиения конфигурации слоёв дихроичного зеркала по двум дополнительным подложкам, которые в литературе также называют «подложка-свидетель» («witness substrate»). Из рисунка следует, что спектры отражения контрольных подложек при таком разбиении соответствуют спектрам отражения одного толстого слоя, имеют экстремумы и точки перегиба, а главное, практически не зависят от спектра отражения создаваемого фильтра.

На основании сравнения достоинств и недостатков различных оптических методов контроля и их классификации в разрабатываемом образце системы контроля было решено использовать *метод непрямого широкополосного контроля по спектрам отражения*, как наиболее универсальный и перспективный метод повышения точности измерения толщин слоёв.

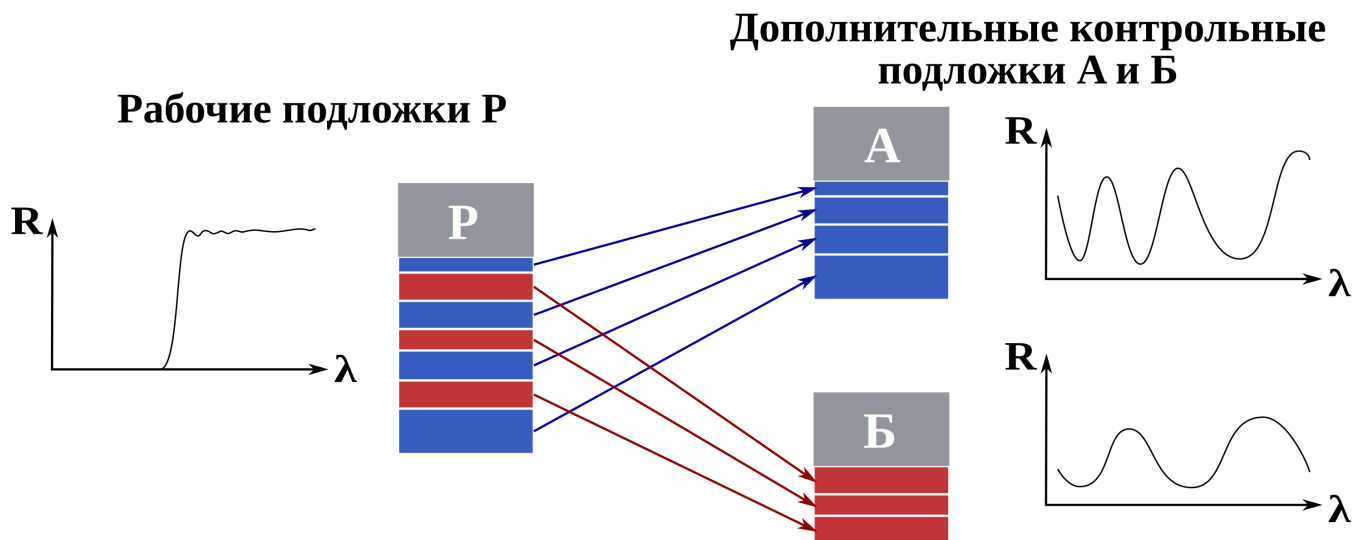


Рисунок 1 – Разбиение слоёв целевого покрытия из двух материалов на две дополнительные контрольные подложки в случае непрямого оптического контроля (на графиках схематично изображены спектры отражения подложек с покрытием)

Вторая глава посвящена исследованию влияния характеристик основных элементов системы контроля (линейки фотодетекторов, спектрометра и источника излучения) и параметров нанесения на уровень случайных и систематических погрешностей измерения толщин слоёв.

Представлены известные способы решения прямой и обратной задач многослойных покрытий, а также рассмотрена задача синтеза покрытий путём минимизации функционала невязки. Приведены программные системы, которые осуществляют решение этих задач, и указаны причины выбора одной из них — пакета численного расчёта «OptiLayer/OptiReOpt».

Предложена компьютерная модель системы контроля, которая учитывает основные факторы, влияющие на качество получаемых многослойных покрытий:

- шумы линейки фотодетекторов в спектрометре;
- спектральный диапазон широкополосного контроля;
- количество фотодетекторов в линейке спектрометра;
- погрешность калибровки спектрометра по длинам волн;
- дрейф интенсивности источника излучения;
- погрешность показателя преломления наносимых материалов.

На Рисунке 2 представлена схема моделирования системы контроля, где зелёным цветом отмечены входные параметры, а синим – выходной. В соответствии с предложенной моделью разработано программное обеспечение «Deposition Control Simulator», позволяющее проводить моделирование измерения толщины слоя и оценивать влияние рассмотренных факторов на случайные и систематические погрешности измерения как по отдельности, так и совместно.

В качестве отправных характеристик элементов моделируемой системы рассматривались характеристики элементной базы, которую планировалось использовать для создания образца системы контроля: малогабаритного спектрометра «Колибри-2» на основе линейки фотодиодов БЛПП-369 (количество фотоячеек – 2612, зарядовая ёмкость фотоячейки – 2 000 000 электронов, шум

чтения – 150 электронов) и источника излучения «Ocean Optics HL-2000-FHSA» на основе галогенной лампы. В качестве материалов слоёв в моделировании использованы диэлектрики TiO_2 и SiO_2 , поскольку они широко применяются при создании многослойных оптических покрытий и обладают относительно высоким и низким показателями преломления соответственно.

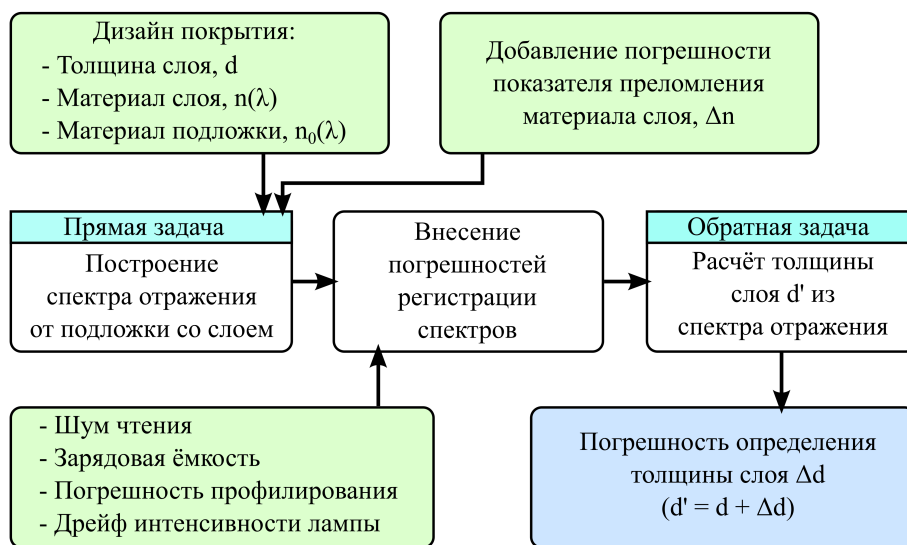


Рисунок 2 – Схема работы программы моделирования системы контроля

При фиксированных значениях входных параметров проводились многократные циклы моделирования, отличающиеся случайными реализациями шума. Для решения прямой и обратной задач многослойных покрытий использовалась библиотека «OptiReOpt». В результате получены зависимости погрешностей определения толщины слоя от его толщины, которые разделены в приближении закона нормального распределения на систематические и случайные. При этом под систематической погрешностью понималось отклонение среднего значения (математического ожидания) рассчитанной толщины слоя от реальной, а под случайной погрешностью – среднее квадратическое отклонение результатов измерений. На Рисунке 3 приведены зависимости систематической погрешностей от толщины измеряемого слоя при учёте совместного влияния всех рассматриваемых факторов для материалов TiO_2 и SiO_2 , случайные погрешности показаны доверительными интервалами 3σ . Для построения каждой точки зависимостей использованы выборки из 100 циклов моделирования для значений погрешностей показателя преломления материала слоя 0 % и 0,5 %.

Видно, что для погрешности показателя преломления материалов менее 0,5 % возможно получение погрешности измерения физической толщины слоя, не превышающей 0,2 нм при толщине слоя:

- 300 – 2400 нм для материала TiO_2 на подложке BK7;
- 800 – 2200 нм для материала SiO_2 на подложке LASF-01.

При исследовании влияния факторов совместно и по отдельности было показано, что при толщинах слоёв менее 1000 – 1500 нм наибольший вклад в погрешность измерения вносят дрейф интенсивности источника излучения и погрешности показателя преломления, а при увеличении толщины слоёв — погрешность градуировки спектрометра по длинам волн, которая приводит к зависимости, близкой к линейной для достаточно больших толщин (Рисунок 3).

По результатам исследования были сформулированы рекомендации для снижения погрешности измерения толщины наносимого слоя при использовании метода непрямого широкополосного контроля:

- для уменьшения случайной погрешности, вызванной шумами линейки фотодетекторов, необходимо для наносимых материалов выбирать контрольную подложку (или подложку с предварительно нанесённым слоем) так, чтобы значения показателей преломления материала и подложки (или предварительно нанесённого слоя на подложку) существенно отличались;
- влияние погрешности профилирования, которое растёт с толщиной слоя, приводит к необходимости замены контрольной подложки по достижению определённой толщины слоя материала, например, на модельной установке – при 2000 – 3000 нм;
- для уменьшения систематической погрешности, вызванной дрейфом интенсивности источника излучения, необходимо примерно раз в час проводить повторную калибровку системы контроля путём установки в область контроля калибровочной (эталонной) подложки и регистрации её спектров отражения;
- для расширения диапазона толщин контролируемых слоёв и снижения погрешности их измерения желательно определять показатель преломления материала в ходе нанесения, поскольку его погрешность ограничивает толщину слоя, для которой возможен контроль используемыми алгоритмами.

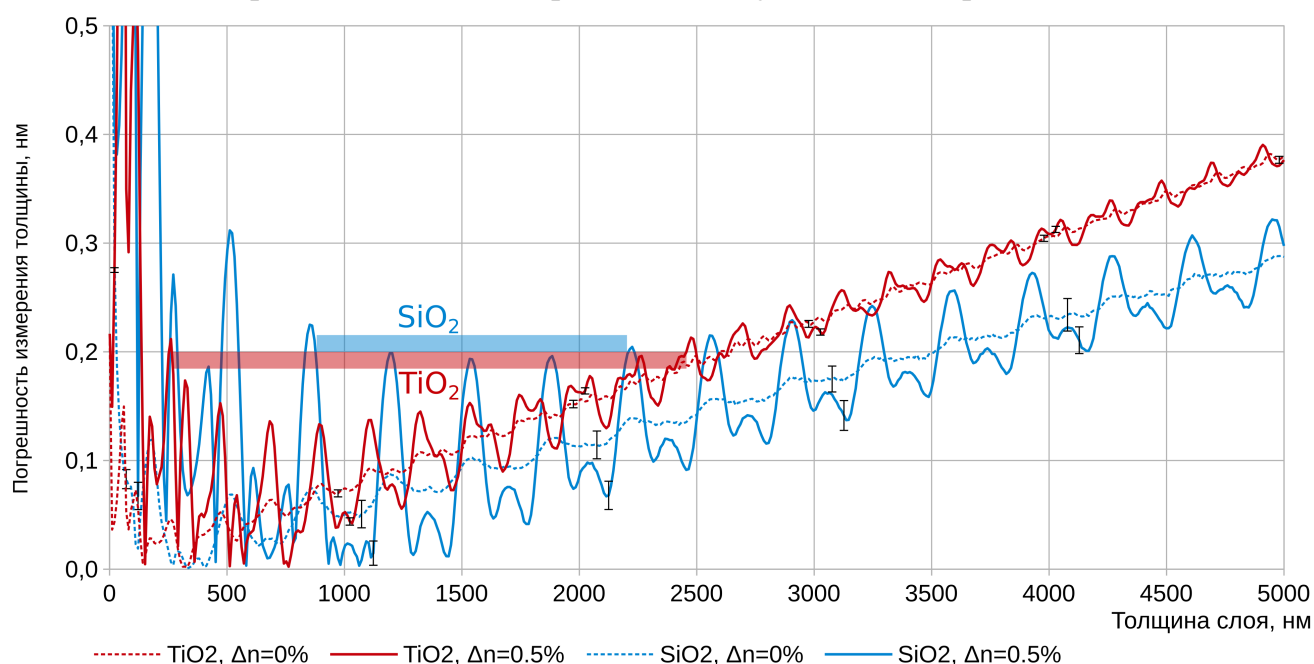


Рисунок 3 – Зависимость систематических погрешностей измерения толщины слоя от толщины слоя для материалов TiO_2 и SiO_2 (случайные погрешности показаны доверительными интервалами 3σ)

Стоит отметить, что данное исследование проведено на основе ограниченного перечня источников погрешностей измерения. В частности, не рассмотрены такие эффекты как погрешность задания показателя преломления подложек (поскольку его можно предварительно более точно измерить на стационарном спектрофотометре), неоднородности показателя преломления внутри слоёв, шероховатость границ раздела и различные факторы самого процесса вакуумного нанесения –

однородность распыления материала в камере, качество ассистирования, паразитные подпыления, немгновенность остановки нанесения материала и другие, которые неизбежно увеличивают погрешности контроля и нанесения. Тем не менее, исследование предоставляет оценку минимальных ожидаемых погрешностей и даёт ценные рекомендации для проектирования системы контроля, работающей с помощью метода непрямого оптического широкополосного контроля.

Третья глава посвящена разработке метода измерения толщин тонких стартовых слоёв с погрешностью, не превышающей погрешности измерения последующих слоёв покрытия. Для этого с помощью компьютерного моделирования было проведено исследование погрешностей нанесения слоёв с физическими толщинами 0 – 500 нм с шагом 1 нм и 100 циклами моделирования в каждой точке. На основании проведённого исследования предложен метод контроля тонких стартовых слоёв, который заключается в том, что измерение толщины проводится методом непрямого широкополосного контроля, а на контрольную подложку предварительно наносится слой материала достаточной толщины, чтобы в спектрах отражения или пропускания подложки со слоем появились экстремумы и точки перегиба. Толщина предварительно нанесённого слоя выбирается на основе результатов компьютерного моделирования с целью получения оптимальной для контроля толщины слоя на момент окончания его нанесения.

На Рисунке 4 представлено сравнение контроля в случае без предварительно нанесённого слоя (а) и с ним (б), когда на подложке 1 присутствует не только контролируемый слой 2, но и предварительно нанесённый слой 3. Материал при этом может как совпадать с материалом первого слоя, так и отличаться. Благодаря предварительно нанесённому слою в получаемых спектрах отражения или пропускания присутствуют экстремумы и точки перегиба, а определение толщины наносимого слоя происходит с погрешностями аналогичными остальным не стартовым слоям.

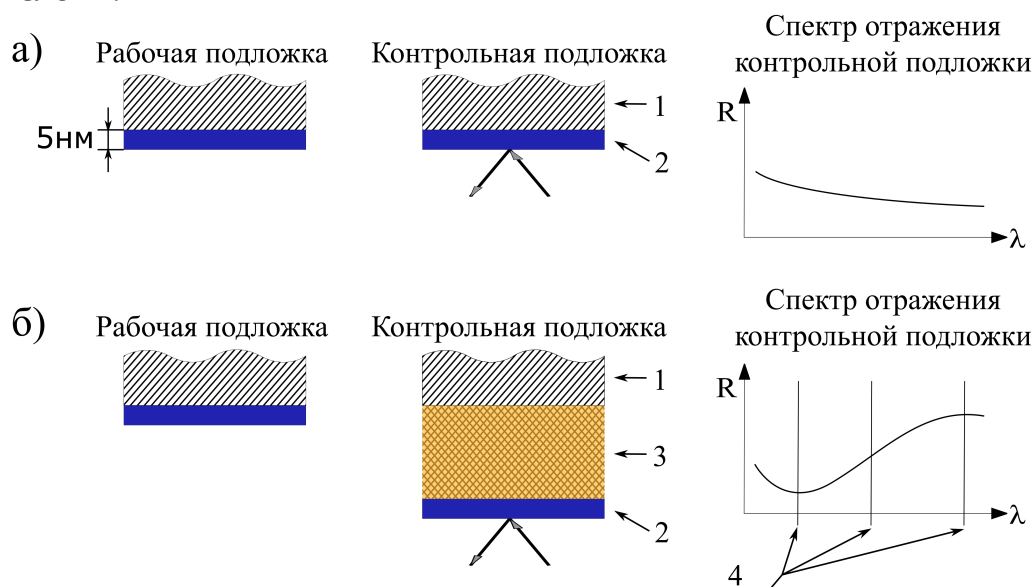


Рисунок 4 – Применение метода непрямого широкополосного контроля с предварительно нанесённым слоем для контроля нанесения слоя 5 нм, где 1 – контрольная подложка, 2 – слой толщиной 5 нм, 3 – предварительно нанесённый слой рассчитанной толщины, 4 – экстремумы и точки перегиба в спектре

Результаты исследования погрешностей измерения толщин слоёв 5, 10, 50 и 100 нм из материалов TiO₂ и SiO₂ в случае применения предварительно нанесённого слоя представлены в Таблице 1. Видно, что для обоих материалов и всех толщин слоёв произошло уменьшение погрешности измерения толщины слоя в 2 – 5 и более раз. Метод наиболее эффективен при измерении самых тонких слоёв, так для слоя 5 нм SiO₂ он позволяет уменьшить систематическую погрешность на два порядка.

Таблица 1 – Сравнение систематической и случайной погрешностей измерения толщины стартовых слоёв в случае применения метода контроля с предварительно нанесённым слоем (компьютерное моделирование)

Материал слоя и подложка	Физическая толщина слоя, [нм]	Погрешность измерения физ. толщины, [нм]			
		Метод непрямого контроля		Метод непрямого контроля с предвар. нанес. слоем 1000 нм	
		систем.	случ., 3σ	систем.	случ., 3σ
TiO ₂ на подложке BK7	5	0,10	0,008	0,051	0,007
	10	0,14	0,006	0,050	0,007
	50	0,88	0,009	0,061	0,006
	100	0,49	0,006	0,137	0,006
SiO ₂ на подложке LASF-01	5	3,50	0,12	0,023	0,021
	10	0,59	0,075	0,024	0,020
	50	0,41	0,019	0,012	0,031
	100	0,91	0,033	0,024	0,024

Четвёртая глава посвящена разработке и экспериментальному апробированию физико-технического решения системы контроля, используя результаты компьютерного моделирования. Представлены результаты сравнения разработанной системы с существующими решениями крупных мировых производителей вакуумных установок и систем оптического контроля. Также приведены примеры покрытий, созданных с использованием данной системы контроля. Для просветляющего покрытия проведено сравнение его характеристик с характеристиками аналогов, производимых с помощью отечественных и зарубежных вакуумных установок.

В качестве спектрофотометра в разрабатываемой системе контроля использовался малогабаритный спектрометр «Колибри-2». Данный спектрометр создан по схеме Черни-Тёрнера на основе плоской дифракционной решётки и анализатора МАЭС с одной линейкой фотодетекторов. Его оптическая схема и конструкция оптимизированы для получения спектра высокого качества с низким уровнем фонового излучения в любой из областей, лежащих в спектральном интервале 190 – 1100 нм. Выбор рабочей области осуществляется путём смены и поворота дифракционной решётки. В качестве рабочего спектрального диапазона для применения в системе контроля был выбран диапазон 525 – 990 нм. Выбор такого диапазона обусловлен доступностью для него источника непрерывного спектра, спецификой создаваемых на установке фильтров и тем, что такой диапазон позволяет избежать наложения нерабочих дифракционных порядков спектра. Кроме того, при исследовании с помощью компьютерного моделирования было показано, что увеличение спектрального диапазона контроля не приводит к существенному снижению погрешности измерения толщин. Динамический диапазон спектрометра (при однократной регистрации спектра) составляет 10⁴, уровень рассеянного света –

0,05 %, нелинейность фотоотклика – 0,5 %, количество фотодетекторов – 2612. Минимальное время экспозиции спектрометра составляет 8 мс, что позволяет применять его в системах контроля в реальном времени. В качестве источника излучения использовался «Ocean Optics HL-2000-FHSA» на основе галогенной лампы с дрейфом интенсивности менее 0,3 % в час, цветовой температурой 2800 К, выходной мощностью 6,7 мВт, которая во всём спектральном диапазоне 525 – 990 нм имеет высокую интенсивность.

В результате разработана система контроля с оптической схемой, представленной на Рисунке 5. Излучение источника 1 вводится в волоконно-оптический кабель 2, изображение торца которого строится линзой 3 на контрольной подложке 8. Отражённое от подложки излучение с помощью линзы 12 и волоконного кабеля 13 поступает на вход спектрометра 14. Линзы-ахроматы 3 и 12 и волоконно-оптические кабели 2 и 13 расположены в блоке коллиматоров 15. Ввод и вывод излучения системы контроля осуществлялся через окно 4. Держатель с подложками 7, 8 и 9 обеспечивает их смену при проведении калибровки системы контроля и изменении материала очередного слоя. Материалы наносились методом электронно-лучевого испарения из водоохлаждаемых тиглей 5 и 11.

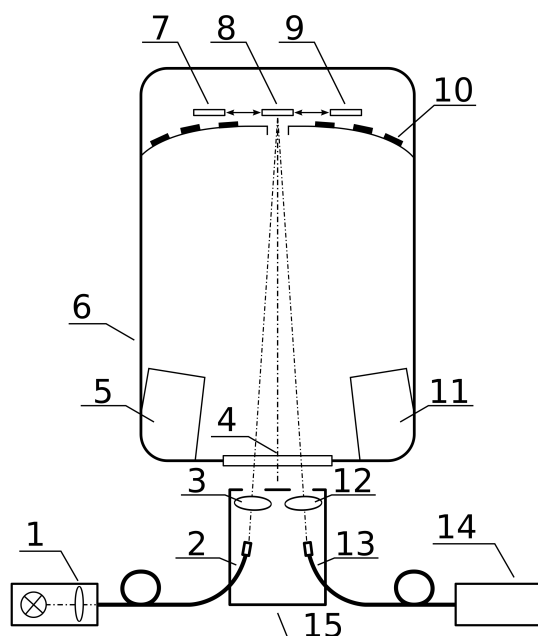


Рисунок 5 – Оптическая схема системы контроля: 1 – источник излучения; 2, 13 – волоконно-оптические кабели; 3, 12 – линзы; 4 – оптическое окно вакуумной камеры; 5, 11 – тигли с различными материалами; 6 – вакуумная камера; 7, 9 – скрытые от нанесения дополнительные контрольные подложки; 8 – контрольная подложка доступная для нанесения; 10 – рабочие подложки, на которые наносится целевое покрытие; 14 – спектрометр «Колибри-2»; 15 – блок коллиматоров

Блок коллиматоров 15 обеспечивает юстировку оптической системы контроля, позволяя сфокусировать излучение на подложку (в световое пятно диаметром 6 мм) и собрать отражённое от подложки излучение в оптоволоконный кабель.

Помимо требований, предъявляемых к характеристикам приборной части системы, высокие требования предъявляются и к программному обеспечению для ведения широкополосного контроля. Для этой цели было разработано программное обеспечение «LayerControl» (Рисунок 6), которое поддерживает такие функции, как

импорт конфигурации покрытия из программного обеспечения «OptiLayer», автоматическое разбиение дизайна покрытия в случае применения метода непрямого контроля с использованием дополнительных контрольных подложек, калибровку системы по калибровочной подложке с известным спектром отражения, регистрацию спектра отражения (пропускания) в спектральном диапазоне контроля, визуализацию расчётного и экспериментального спектров отражения (пропускания) в реальном времени, расчёт текущей толщины наносимого слоя и разницы с проектной толщиной, сигнализацию оператору о завершении нанесения слоя, визуализацию скорости нанесения для контроля равномерности нанесения и возможность ручного изменения дизайна покрытия.

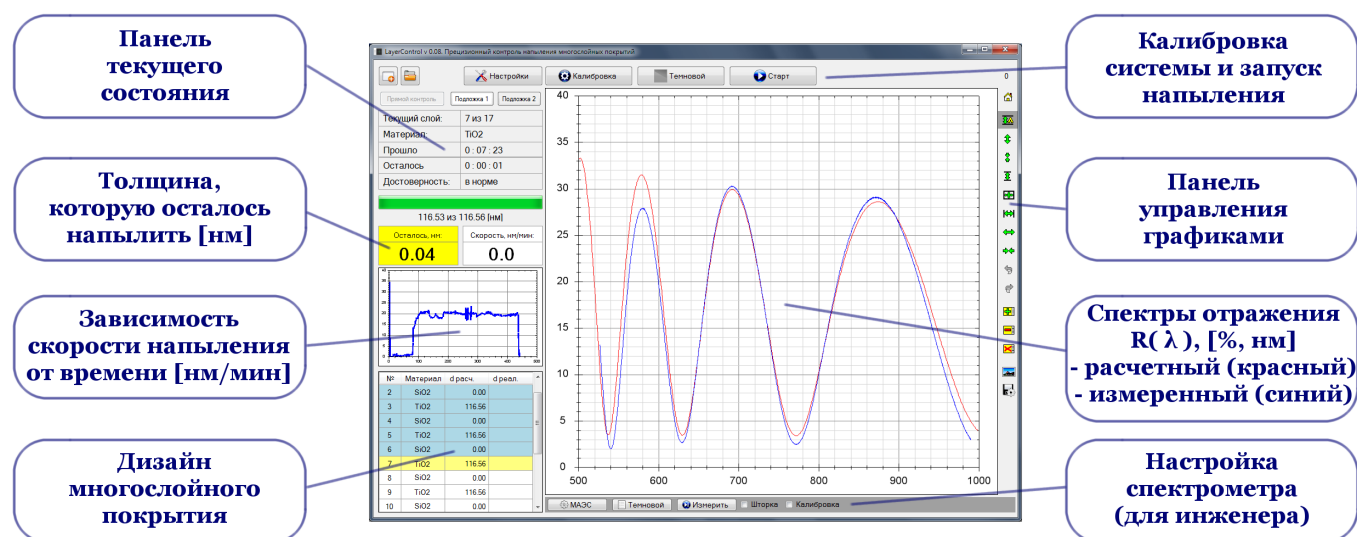


Рисунок 6 – Основное окно ПО системы контроля «LayerControl»

ПО «LayerControl» обладает рядом возможностей, совокупность которых делает его уникальным среди известных решений:

- Возможность переключения в режим учёта измеренных толщин, когда расчётный спектр отражения строится не на основании изначального импортированного дизайна покрытия, а с учётом уже измеренных толщин нанесённых слоёв. В этом случае улучшается соответствие расчётного и экспериментального спектров отражения.
- Возможность переключения в режим визуализации спектров целевого покрытия при использовании метода непрямого широкополосного контроля, когда учитываются характеристики рабочих подложек, которые могут отличаться от контрольных. Этим приёмом удаётся устранить один из недостатков непрямого контроля – отсутствие наглядности и информации о спектральных характеристиках рабочего покрытия.
- Возможность сохранения последовательности зарегистрированных спектров отражения или пропускания в ходе нанесения всего покрытия для последующего анализа всего процесса нанесения.

Система прецизионного спектрального контроля толщин слоёв была установлена на вакуумную установку для нанесения многослойных покрытий «ВУ-2М», расположенную в Институте лазерной физики (ИЛФ СО РАН), г. Новосибирск (Рисунок 7).

При использовании метода непрямого широкополосного контроля по спектрам отражения и выполнении рекомендаций компьютерного моделирования, были получены следующие характеристики контроля:

- спектральный диапазон контроля – 525 – 990 нм;
- быстродействие регистрации спектров отражения – 100 спектров/с;
- время измерения толщины текущего слоя – 0,5 – 1 с;
- случайная погрешность измерения толщины слоя – 0,02 нм;
- погрешность нанесения слоя – около 1,0 нм.

Случайная погрешность измерения толщины слоя 0,02 нм является величиной, усреднённой по световому пятну диаметром 6 мм на контрольной подложке, и получена за счёт высокой информативности регистрируемых спектров отражения, содержащих 2612 точек. Оценка случайной погрешности проводилась путём анализа выборки из 1000 независимых измерений толщины слоёв TiO_2 , SiO_2 и MgF_2 при остановленном нанесении покрытия и выключенных испарителей (чтобы избежать возможного подпыления материала), каждое из которых проводилось путём отдельной регистрации спектра и решения обратной задачи. Было установлено, что в приближении нормального распределения доверительному интервалу 3σ соответствует диапазон $\pm 0,02$ нм. Для различных материалов интервал был разный, но в целом этой величиной можно оценить минимальное измеряемое системой приращение толщины наносимого слоя. Значение погрешности нанесения слоя было грубо оценено исходя из спектральных характеристик получаемых оптических покрытий и определяется в основном факторами, не зависящими от системы контроля, такими как: характеристики вакуумной установки, механизм прекращения нанесения материала, характеристики системы ассистирования, погрешность показателей преломления наносимых материалов и другими.

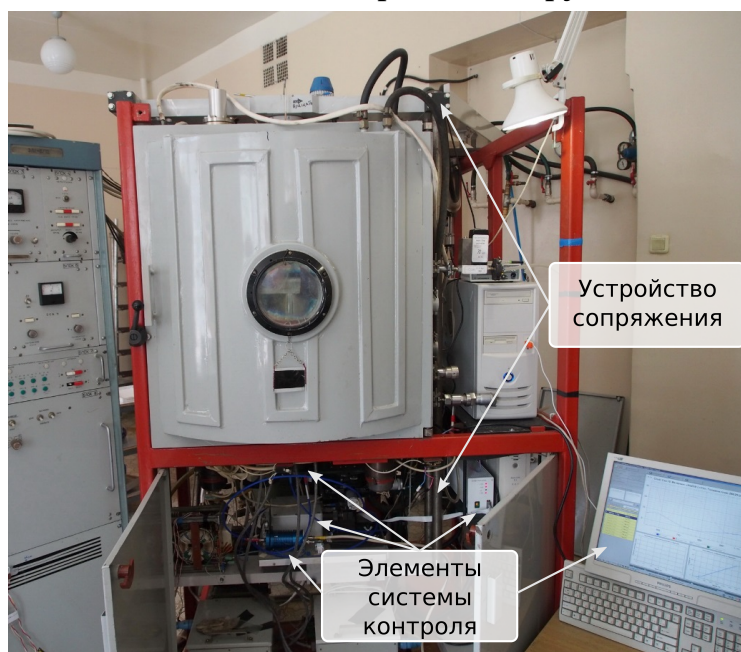


Рисунок 7 – Фотография системы контроля в составе вакуумной установки «ВУ-2М»

В ходе эксплуатации установки на ней были изготовлены дихроичные и широкополосные зеркала, светоделители, просветляющие покрытия и другие многослойные оптические покрытия, которые не уступают по характеристикам фильтрам, производимым с помощью отечественных и зарубежных вакуумных

установок. Например, с помощью данной системы контроля были нанесены высокоэффективные просветляющие покрытия для видимого диапазона излучения 400 – 670 нм, спектр отражения которых представлен на Рисунке 8. В выбранном спектральном диапазоне покрытие имеет максимальный коэффициент отражения 0,15 %. Для сравнения, в настоящее время типичный коэффициент отражения для покрытий с просветлением в диапазоне чувствительности человеческого глаза, изготовленных на отечественных оптико-механических заводах, составляет 1 % и более. Также в диссертации путём сравнения показано, что по совокупности таких характеристик, как спектральный диапазон, уровень среднего и максимального коэффициентов отражения, данное покрытие превосходит доступные решения для схожего спектрального диапазона, предлагаемые ведущими производителями просветляющих покрытий: AccuCoat (США), TSP (США), WTS Photonics CO (Китай), NHV Technologies (Индия; США; Великобритания) и другими.

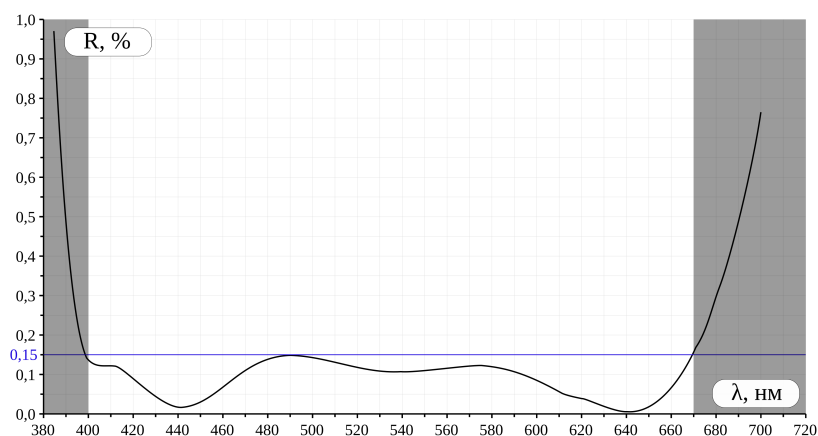


Рисунок 8 – Спектр отражения просветляющего покрытия (AR-фильтра), полученного на установке, оснащённой разработанной системой контроля

В работе представлено сравнение разработанной системы с лучшими решениями таких компаний, как Bühler Leybold Optics (Германия), Dynavac (США), OptoRun Co. Ltd. (Япония), Eddy Co. (США), ЭссентОптикс (Беларусь) и IzoVac (Беларусь), которые занимаются серийным производством вакуумных установок и систем оптического контроля (Таблица 2). Для сравнения брались лучшие серийные решения систем контроля (иногда в составе вакуумных установок) для контроля схожего диапазона длин волн. Характеристики систем контроля были взяты из спецификаций (при их наличии) и информационных буклетов с официальных сайтов производителей. Конечно, в Таблице 2 приведены не все возможные характеристики систем контроля, а лишь особенно важные при измерении толщин слоёв с помощью метода непрямого широкополосного контроля с возможностью решения обратных задач многослойных покрытий в реальном времени (*in situ*), при этом возможность работы по спектрам отражения рассматривалась как преимущество.

Как видно из таблицы сравнения, по совокупности таких характеристик, как возможность ведения непрямого широкополосного контроля по спектрам отражения, определение толщины наносимого слоя, скорости его нанесения и момента остановки в реальном времени путём численного решения обратных задач многослойных покрытий, разработанная система контроля **превосходит** рассмотренные известные решения.

Таблица 2 – Сравнение характеристик разработанной системы контроля с лучшими решениями, предлагаемыми известными мировыми производителями

Производитель	Разработанная система + ВУ-2М	Bühler Leybold Optics		OptoRun Co. Ltd.
Название системы		OMS 5100 + SYRUSpro	ВВМ + HELIOS	НОМ2-R-VIS350А + ОТFC-1800
Страна	Россия	Германия		Япония
Спектр. диапазон	525-990 нм	200-2500 нм	250-1050 нм	350-1100 нм
Фотометрический контроль	Широкополосный	Монохроматич. с перестройкой	Широкополосный	Широкополосный
Метод контроля	Прямой, не прямой	Прямой, не прямой	Прямой	Прямой
Расчёт толщины	Да	Нет	Да (?)	Нет
Характеристика	Р	Р или Т	Т	Р или Т
Кол-во детекторов	2612	1	2048	60
Спектры в реальном времени	Да (8 мс)	Да (1 мс)	Да (2 мс)	Да
Критерий остановки	По толщине и по спектру	Поворотная точка	По толщине	Автоматический по спектру

Производитель	Разработанная система + ВУ-2М	Dynavac		Eddy Co.
Название системы		Spectrum-Pro	Spectrum-Pro	SL-2012А Spectralock
Страна	Россия	США		США
Спектр. диапазон	525-990 нм	350-2000 нм	200-1000 нм	400-900 нм
Фотометрический контроль	Широкополосный	Монохроматич. с перестройкой	Широкополосный	Широкополосный
Метод контроля	Прямой, не прямой	Прямой, не прямой	Прямой	Прямой, не прямой (?)
Расчёт толщины	Да	Нет	Да	Нет
Характеристика	Р	Р или Т	Р или Т	Р
Кол-во детекторов	2612	1	700	–
Спектры в реальном времени	Да (8 мс)	Да (100 мс)	Да (5 мс)	–
Критерий остановки	По толщине и по спектру	Поворотная точка	По толщине и по спектру	По спектру

Производитель	Разработанная система + ВУ-2М	ЭссентОптикс	IzoVac	
Название системы		IRIS 0411 (на базе EOS 45)	Invisio M	ОСР Broadband
Страна	Россия	Беларусь	Беларусь	
Спектр. диапазон	525-990 нм	380-1100 нм	200-1100 нм и др.	370-1050 нм и др.
Фотометрический контроль	Широкополосный	Широкополосный	Широкополосный	Широкополосный
Метод контроля	Прямой, не прямой	Прямой (?)	Прямой (?)	Прямой, не прямой
Расчёт толщины	Да	Нет	Нет	Нет
Характеристика	Р	Р или Т	Р или Т	Р или Т
Кол-во детекторов	2612	> 450 (?)	–	–
Спектры в реальном времени	Да (8 мс)	Да (10 мс)	Нет (30-180 с)	Да (?)
Критерий остановки	По толщине и по спектру	По спектру	–	Автоматический по спектру

В заключении сформулированы следующие основные результаты диссертации:

1. Проведено сравнение методов оптического и неоптического контроля. Дана классификация методов оптического контроля и обоснован выбор непрямого широкополосного контроля нанесения многослойных покрытий по спектрам отражения, как универсального и перспективного метода повышения точности измерения толщин слоёв.
2. Разработана компьютерная модель системы широкополосного контроля, позволяющая проводить исследование влияния характеристик её основных элементов (линейки фотодетекторов, спектрометра и источника излучения) и погрешности показателей преломления наносимых материалов на уровень случайных и систематических погрешностей измерения толщин слоёв.
3. Путём компьютерного моделирования проведено исследование влияния характеристик элементов системы непрямого широкополосного контроля на погрешности измерения толщин слоёв. Обнаружено существование диапазона оптимальных толщин слоя, при которых достигаются наименьшие погрешности измерения. При больших толщинах наблюдается высокая погрешность, обусловленная погрешностью градуировки спектрометра по длинам волн, а при меньших – дрейфом интенсивности источника излучения и погрешностью показателя преломления. Для разработанной системы контроля определены оптимальные диапазоны толщин – это 300 – 2400 нм физической толщины для материала TiO_2 на подложке BK7 и 800 – 2200 нм для SiO_2 на LASF-01.
4. Предложен новый метод контроля многослойных покрытий с предварительно нанесённым слоем (слоями), который позволяет в 2 – 5 раз уменьшить погрешность измерения для стартовых слоёв с толщинами менее 100 – 250 нм (в зависимости от материала). Метод наиболее эффективен при измерении толщин нанометровых слоёв, так для слоя 5 нм SiO_2 на подложке LASF-01 он позволяет снизить систематическую погрешность измерения на два порядка.
5. Предложено и экспериментально апробировано физико-техническое решение системы, которая позволяет вести не прямой широкополосный контроль нанесения слоёв по спектрам отражения с определением толщины слоёв, скорости их нанесения и момента остановки путём численного решения обратной задачи многослойных покрытий в реальном времени. Созданная система по совокупности характеристик превосходит известные решения оптических систем контроля. С помощью данной системы на отечественной вакуумной установке «ВУ-2М» удалось изготовить дихроичные и широкополосные зеркала, светоделители, просветляющие покрытия и другие многослойные покрытия, которые превосходят по характеристикам многие фильтры, производимые с помощью современных зарубежных вакуумных установок. Это даёт возможность их импортозамещения путём оснащения существующих на отечественных предприятиях вакуумных установок разработанной системой широкополосного контроля.

При выполнении диссертации **решена важная научно-техническая задача** создания системы контроля, способной контролировать процесс нанесения многослойных оптических покрытий с измерением толщины слоя и скорости его нанесения в реальном времени в процессе нанесения (*in situ*) в широком спектральном диапазоне. Созданная система по совокупности таких характеристик, как возможность ведения широкополосного непрямого контроля по спектрам отражения, определение толщины наносимого слоя, скорости его нанесения и момента остановки путём численного решения в реальном времени обратных задач, превосходит известные решения мировых производителей систем контроля.

Автор считает необходимым выразить искреннюю признательность своим коллегам – И. А. Зарубину, Г. В. Эргу, М. С. Саушкину, О. А. Неклюдову, А. С. Паку, Д. О. Селюнину и научному руководителю В. А. Лабусову – за плодотворную совместную работу, а также профессору П. Е. Твердохлебу – за полезные обсуждения цели, задач и результатов диссертации.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Лабусов, В. А. Система спектрального контроля нанесения многослойных диэлектрических покрытий / В. А. Лабусов, **З. В. Семенов**, И. А. Зарубин, М. С. Саушкин, Г. В. Эрг, С. И. Ковалёв // Измерительная техника №12. – 2013. – С. 11-14.

Labusov, V.A. A System for the Spectral Monitoring of the Deposition of Multilayer Dielectric Coatings / V.A. Labusov, **Z.V. Semenov**, I.A. Zarubin, M.S. Saushkin, G.V. Erg, S.I. Kovalev // Measurement Techniques 56, no. 12. – 2014. – pp. 1327-1332. **(входит в реферативные базы Scopus и Web of Science)**

2. Семенов, З. В. Исследование погрешностей непрямого способа спектрального контроля толщин слоёв многослойных оптических покрытий путём компьютерного моделирования / **З. В. Семенов**, В. А. Лабусов // Автометрия 53, № 6. – 2017. – С. 3-14.

Semenov, Z.V. Error Analysis of Indirect Broadband Monitoring of Multilayer Optical Coatings using Computer Simulations / **Z.V. Semenov**, V.A. Labusov // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing 53, no. 6. – 2017 – pp. 537-547. **(входит в реферативные базы Scopus и Web of Science)**

3. Семенов, З. В. Применение многослойных диэлектрических покрытий для подавления излучения нерабочих порядков спектра в спектрометрах с дифракционной решёткой / **З. В. Семенов**, В. А. Лабусов, И. А. Зарубин, Г. В. Эрг // Заводская лаборатория. Диагностика материалов 83, №. 1-2. – 2017. – С. 117-122.

Патенты и свидетельства:

4. Способ измерения толщин нанометровых слоёв многослойного покрытия, проводимого в процессе его напыления: пат. 2527670 Российская Федерация / В. А. Лабусов, Г. В. Эрг, **З. В. Семенов** – международная заявка РСТ № RU 2012/000001; заявл. 10.01.2012; опубл. 10.09.2014.
5. Семенов, З.В. LayerControl: Программа для контроля толщин слоёв многослойных покрытий / **З. В. Семенов** // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015661646 от 02.11.2015 г. – 2015.
6. Семенов, З.В. Deposition Control Simulator: Программа моделирования работы системы контроля / **З. В. Семенов** // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016612869 от 11.03.2016 г. – 2016.

Публикации в прочих журналах и материалах конференций:

7. Лабусов, В. А. Система контроля многослойных оптических покрытий на основе многоканального спектрометра «Колибри-2» / В. А. Лабусов, **З. В. Семенов**, И. А. Зарубин, М. С. Саушкин // Материалы студенческой конференции «Оптика и Фотоника», 10-11 ноября 2008 г. – Новосибирск: ИАиЭ СО РАН, 2008. – С. 2.
8. Семенов, З. В. Программа контроля напыления многослойных покрытий «LayerControl» / **З. В. Семенов** // Материалы конференции «Фотоника и оптические технологии», 10-12 февраля 2010 г. – Новосибирск: ИАиЭ СО РАН, Физический факультет НГУ, 2010. – С. 64-65.
9. Семенов, З. В. Система контроля напыления многослойных покрытий / **З. В. Семенов**, И. А. Зарубин // Материалы XLVIII международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс», 10-14 апреля 2010 г. – Новосибирск: НГУ, 2010. – С. 109.
10. Лабусов, В. А. Контроль толщин слоёв многослойных оптических покрытий на основе спектрометра «Колибри - 2» / В. А. Лабусов, **З. В. Семенов**, И. А. Зарубин, М. С. Саушкин, Г. В. Эрг, С. И. Ковалёв // Материалы XIII международного симпозиума «Применение анализаторов МАЭС в промышленности», 13-15 августа 2013 г. – Новосибирск: «ВМК-Оптоэлектроника», ИАиЭ СО РАН, НГТУ, 2013. – С. 139-144.
11. Семенов, З. В. Система спектрального контроля нанесения многослойных оптических покрытий в широком спектральном диапазоне / **З. В. Семенов**, В. А. Лабусов, И. А. Зарубин // Интерэкспо Гео-Сибирь Т. 5, №2. – 2018. – С. 179-191.

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, тел./факс (383) 346-08-57
Формат 60x84 1/16. Объём 1.5 п.л. Тираж 100 экз.
Заказ № 2324. Подписано в печать 22.10.2019 г.

