

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт автоматики и электрометрии
Сибирского отделения Российской академии наук

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
Лабусов Владимир Александрович

Новосибирск – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МЕТОДА НЕПРЯМОГО ШИРОКОПОЛОСНОГО КОНТРОЛЯ.....	15
1.1 Сравнение оптических методов контроля с неоптическими.....	15
1.2 Методы оптического контроля по спектрам отражения и пропускания...26	
1.3 Методы широкополосного и монохроматического контроля.....	35
1.4 Методы прямого и непрямого оптического контроля.....	40
Выводы к главе 1.....	47
2 ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	49
2.1 Перспективность компьютерного моделирования систем контроля.....	50
2.2 Программное обеспечение для решения прямых и обратных задач.....	52
2.3 Модель вакуумной установки и системы контроля.....	62
2.4 Результаты моделирования и их обсуждение.....	70
Выводы к главе 2.....	80
3 РАЗРАБОТКА МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИН ТОНКИХ СТАРТОВЫХ СЛОЁВ.....	83
3.1 Анализ погрешностей измерения толщин тонких стартовых слоёв.....	84
3.2 Предпосылки для снижения погрешностей определения толщин.....	88
3.3 Метод непрямого контроля с предварительно нанесённым слоем.....	92
3.4 Выводы к главе 3.....	96

4 СОЗДАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ ШИРОКОПОЛОСНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ.....	97
4.1 Разработка системы спектрального широкополосного контроля.....	98
4.2 Технология контроля нанесения покрытия.....	112
4.3 Применение системы контроля.....	119
4.4 Сравнение системы контроля с существующими решениями.....	129
Выводы к главе 4.....	133
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	136
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	139
ПРИЛОЖЕНИЕ А АКТЫ О ВНЕДРЕНИИ.....	152
ПРИЛОЖЕНИЕ Б ПАТЕНТ НА ИЗОБРЕТЕНИЕ.....	155
ПРИЛОЖЕНИЕ В СВИДЕТЕЛЬСТВА О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММ ДЛЯ ЭВМ.....	156

ВВЕДЕНИЕ

Диссертация посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию метода непрямого широкополосного контроля (в широком спектральном диапазоне) толщин многослойных покрытий с использованием численного решения обратных задач в реальном времени в процессе нанесения (*in situ*) для снижения погрешностей измерения толщин наносимых слоёв. Под обратной задачей понимается вычисление толщин слоёв покрытий по их спектрам отражения или пропускания. Разработана компьютерная модель системы контроля. Исследовано влияние характеристик элементов системы и параметров нанесения на случайные и систематические погрешности измерения толщин наносимых слоёв. Решена проблема нанесения тонких стартовых слоёв. Разработан, создан и внедрён в состав вакуумной установки опытный образец системы контроля. Проведено сравнение его характеристик с лучшими решениями, предлагаемыми известными мировыми производителями вакуумных установок и систем контроля. Изготовлены с применением данной системы дихроичные и широкополосные зеркала, светоделители, просветляющие покрытия и другие многослойные оптические покрытия. Проведено сравнение их спектральных характеристик с характеристиками аналогов, производимых с помощью отечественных и зарубежных вакуумных установок.

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 [1; 2]. 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. Существуют различные способы нанесения материалов: термическое, электронно-лучевое и ионное испарения, катодное, магнетронное и высокочастотное распыления и другие [3; 4; 5; 6; 7]. 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 [8; 9].

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 [8; 10], 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 (монохроматический контроль) [11; 12; 13; 14; 15], на нескольких длинах волн [16; 17] и в широком спектральном диапазоне (*широкополосный* контроль) [18; 19; 20; 21]. Наиболее информативным и точным вариантом оптического контроля является метод широкополосного контроля, пионерские работы по которому представил Б. Видаль в конце 70-х годов [11; 18; 22].

Появление доступных спектрометров с многоэлементными фотоприёмниками позволило измерять на вакуумных установках спектры

отражения и пропускания с несколькими тысячами точек одновременно в реальном времени [23; 24; 25; 26], 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 [19; 20; 21; 27; 28; 29; 30; 31; 32]. 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 [33; 34; 35; 36; 37; 38; 39; 40; 41; 42; 43].

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 [27; 44; 45]. А. В. Тихонравов в 1982 году предложил метод проектирования (синтеза) покрытий, основанный на нелокальной оптимизации с помощью игольчатой вариации («needle optimization») [46; 47], получивший широкое распространение в проектировании оптических покрытий и в настоящее время являющийся одним из наиболее эффективных инструментов для синтеза покрытий [48; 49; 50]. Этот и другие алгоритмы легли в основу коммерческого пакета «OptiLayer», позволяющего численно решать прямые и обратные задачи многослойных покрытий на современных персональных компьютерах [51]. 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 [8; 9].

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 [52]. Одновременно с этим данный метод применялся Г. В. Эргом для создания многослойных покрытий на вакуумных установках 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. Кроме того, данный метод позволяет исключить эффект кумулятивного накопления ошибок в толщинах наносимых слоёв покрытия [53] за счёт возможности смены контрольной подложки. 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 бóльших 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 непрямой 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.

1 ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МЕТОДА НЕПРЯМОГО ШИРОКОПОЛОСНОГО КОНТРОЛЯ

В настоящей 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 и представлена классификация методов спектрального контроля по используемой оптической схеме, спектральной области и способу контроля толщин (прямой и непрямой).

1.1 Сравнение оптических методов контроля с неоптическими

Система контроля может использовать различные методы измерения толщины нанесённого слоя, основанные на разных физических принципах. Определяющими характеристиками методов контроля являются:

- погрешность определения оптической/физической толщины слоя;
- возможность измерения скорости нанесения;
- иные ограничения или особенности метода.

Известно, что формирование многослойных плёнок на подложке зачастую происходит вертикальными столбцами (Рисунок 1) и кажется невозможным говорить о погрешности измерения порядка толщины монослоя осаждаемого материала. Однако при практическом использовании фильтров в оптической системе их спектральные характеристики усредняются по используемой площади фильтра. Благодаря усреднению спектральных характеристик при эксплуатации и

при контроле нанесения на современных системах контроля удаётся достичь усреднённой разрешающей способности по толщине слоя порядка 0,1 нм [21; 54]. В данной работе в дальнейшем под погрешностью определения толщины слоя будет пониматься величина, усреднённая по некоторой площади контроля. Так, например, для кварцевого контроля – это площадь датчика, доступная для нанесения материала, а для оптического контроля – это площадь светового пятна на контрольной подложке.

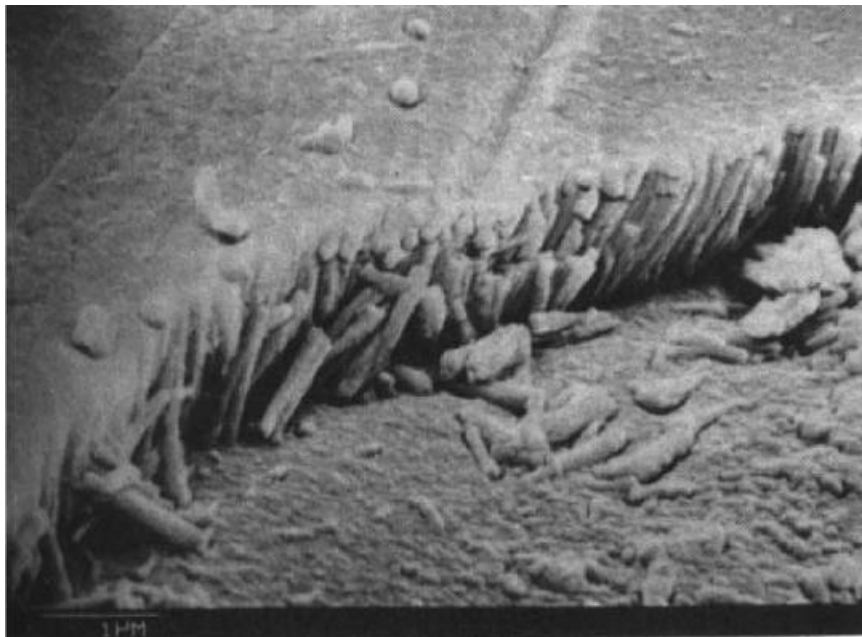


Рисунок 1 – Столбчатая структура плёнки сульфида цинка (ZnS).
Часть плёнки механически удалена, чтобы продемонстрировать столбчатую структуру [55]

Выбор между использованием оптической или физической толщины слоёв зависит от спектральной задачи и предпочтений специалиста. Оптическая толщина слоя является произведением физической толщины слоя на показатель преломления его материала:

$$d_{\text{опт.}}(\lambda) = n(\lambda) \cdot d_{\text{физ.}} \quad (1)$$

Удобство использования оптических толщин в области расчёта многослойных покрытий обусловлено тем, что именно оптическая толщина слоёв определяет их спектральные характеристики. С другой стороны, показатель преломления материала слоя обладает дисперсией и в общем случае является

функцией от длины волны, поэтому однозначно охарактеризовать толщину слоя с помощью оптической толщины можно лишь зафиксировав какую-то референтную (контрольную) длину волны. Для многих покрытий выбор этой длины волны очевиден и удобен, например, для четвертьволновых зеркал. Однако в общем случае, для разнотолщинных покрытий, зачастую становится удобным использование физической толщины, поскольку она является характеристикой слоя, не зависящей от длины волны.

Способность измерения скорости нанесения материала является важной характеристикой метода контроля, поскольку с её помощью можно поддерживать скорость нанесения материала постоянной, например, путём изменения мощности испарителя вакуумной установки, что приводит к повышению однородности и качества получаемых плёнок. Способность измерения скорости нанесения следует из возможности определения толщин покрытия толщин в реальном времени. Действительно, если периодичность таких измерений достаточно мала (например, составляет около секунды или менее), то аппроксимировав измеряемые значения толщины и взяв производную по времени можно определить скорость нанесения материала. Скорость нанесения измеряется в [нм/минуту], либо [$\text{Å}/\text{с}$] физической или оптической толщины слоя.

После рассмотрения перечня базовых характеристик методов можно подробно рассмотреть существующие методы контроля.

Визуальный контроль

На заре технологии многослойных оптических покрытий применялся метод визуального контроля [8; 56], основанный на том, что в процессе нанесения слоя визуально меняется цвет подложки, из-за чего становится возможным приблизительное определение толщины слоя человеческим глазом в свете белого источника излучения при наличии у специалиста достаточного опыта и знаний. Известны очевидные недостатки данного метода – высокая погрешность измерения толщин слоя, недостоверность и субъективность [8; 56]. Из-за этих

недостатков метод визуального контроля впоследствии был вытеснен методами монохроматического контроля и в настоящее время не используется. Для перехода к монохроматическому контролю были сделаны очевидные улучшения: источник белого света был заменён на монохроматический, а человеческий глаз – на фотодетектор [57].

Контроль по времени нанесения

Контроль толщин наносимых слоёв по времени нанесения основан на предположении о достаточном постоянстве скорости нанесения материала в вакуумной установке. Перед созданием целевого покрытия проводят измерение скорости нанесения выбранного материала в рабочих условиях, делая тестовое покрытие и измеряя полученные толщины любыми приборами и методами. Полученную скорость нанесения используют для дальнейшей оценки толщины слоя по времени, прошедшему с начала его нанесения.

Благодаря простоте в реализации данный метод контроля активно применяется при нанесении несложных покрытий, а также покрытий, для которых спектральный контроль затруднён из-за непрозрачности в необходимом диапазоне длин волн. В частности, данный метод контроля применяется для создания EUV-фильтров (экстремальный ультрафиолет) и рентгеновской оптики.

Недостатком данного метода является высокие погрешности в толщинах получаемых слоёв и невозможность измерения скорости нанесения материала, поскольку она изначально предполагается постоянной величиной.

Достоинства контроля по времени нанесения:

1. простота реализации;
2. отсутствие требований к прозрачности материалов.

Недостатки контроля по времени нанесения:

1. не измеряется толщина слоя в процессе его нанесения;
2. не контролируется скорость нанесения;

3. высокие погрешности в толщинах получаемых слоёв.

Контроль с помощью кварцевого датчика (резонатора)

Метод кварцевого контроля толщины слоёв основан на гравиметрическом измерении [8; 58; 59]. Датчиком служит открытый кварцевый резонатор (кварцевый кристалл или пластина), на котором осаждаются частицы наносимого материала, образуя плёнку. Рост толщины плёнки приводит к изменению резонансной частоты, которую с высокой точностью измеряют. Применяв калибровку, определяют изменение массы резонатора с наносимым слоем, откуда находят его толщину. Контроль проводят, как правило, в реальном времени. Нанесение слоя прекращают по достижению расчётной толщины.

Данный метод контроля используется в качестве альтернативы оптическим благодаря простоте реализации и хорошей точности. Для просветляющих, отрезающих фильтров и металлических плёнок данный метод хорошо себя зарекомендовал с конца 70-х годов [60] и получил широкое распространение на вакуумных установках. Разрешающая способность современных кварцевых датчиков и измерителей толщины достигает $\sim 0,1$ нм толщины слоя [54]. Однако на практике результирующие ошибки в толщинах слоёв, получаемых при нанесении, могут достигать 2 нм толщины слоя даже на хорошо откалиброванной системе контроля с кварцевым датчиком [21].

К достоинствам метода можно отнести отсутствие требований к прозрачности материалов в каком-либо спектральном диапазоне. Возможность измерять толщину слоя в процессе нанесения позволяет использовать её для вычисления скорости нанесения. Иногда кварцевый контроль используют в качестве дополнения к простой реализации оптического контроля (без расчёта толщины) с целью контроля скорости нанесения и, как следствие, однородности осаждения слоя [58].

К недостаткам кварцевого контроля относится то, что контроль происходит по массе слоя, а не по его оптической толщине. Нестабильность процесса

нанесения приводит к незначительному изменению показателя преломления наносимых материалов и соответствующему изменению оптической толщины слоя. Это является дополнительным источником ошибок при создании покрытия, которые могут с последующими слоями накапливаться. Из-за невозможности определить оптическую толщину слоя не происходит важного эффекта, свойственного методам оптического контроля – эффекта самокомпенсации ошибок, когда толщины последующих контролируемых слоёв компенсируют погрешности в толщинах предыдущих. По этой причине метод кварцевого контроля плохо подходит для создания покрытий, где эффект самокомпенсации ошибок играет определяющую роль, например, телекоммуникационных (WDM) фильтров [61].

Кроме того, метод кварцевого контроля не является достаточно наглядным, поскольку не позволяет видеть текущий результат нанесения в виде коэффициента пропускания или отражения покрытия в широком спектральном диапазоне или хотя бы на нескольких длинах волн в процессе нанесения.

Достоинства метода кварцевого контроля:

1. относительная простота реализации;
2. отсутствие требований к прозрачности материалов;
3. достаточная для многих задач точность определения усреднённой физической толщины слоя;
4. определение скорости нанесения в реальном времени (в единицах физической толщины).

Недостатки метода кварцевого контроля

1. выше погрешность измерения в сравнении с оптическим контролем;
2. невозможность измерения оптической толщины слоёв;
3. невозможность измерения скорости нанесения в единицах оптической толщины;
4. отсутствие эффекта самокомпенсации;

5. низкая наглядность.

Несмотря на то, что в настоящее время метод кварцевого контроля получил широкое распространение на вакуумных установках, по совокупности достоинств и недостатков он уступает развивающимся методам оптического контроля при создании сложных, высокоточных оптических фильтров. В результате этого большинство современных промышленных установок для нанесения оснащаются либо исключительно оптическими, либо комбинированными системами контроля, где применяется одновременно методы оптического и кварцевого контроля [8; 62].

Другие методы неоптического контроля

Существуют и другие методы неоптического контроля процесса нанесения, которые имеют более узкое применение. Так, существуют методы гравиметрического контроля с различными принципами измерения, отличными от принципа измерения при кварцевом контроле (например, микровесы на основе микроамперметра, собранного по мостовой схеме). Также существуют методы резистивного контроля для измерения толщин металлических плёнок, опирающиеся на зависимость сопротивления металлической плёнки от её толщины. Однако все эти методы либо не обладают достаточной точностью измерения и универсальностью, либо не применимы для диэлектрических материалов, в результате чего редко используются в распространённых промышленных вакуумных установках и в данной диссертации не рассматриваются.

Эллипсометрический контроль (поляризационно-оптический)

Эллипсометрический контроль является перспективным и точным *поляризационно-оптическим* методом измерения, который основан на измерении и анализе состояния поляризации излучения после взаимодействия его с поверхностью границы раздела сред. Данный метод опирается на информацию о поляризации излучения и потому применяется при углах падения излучения, существенно отличных от нормального. Это обусловлено тем, что в соответствии

с формулами Френеля [63; 64], при нормальном падении излучения амплитуды отражённой и прошедшей волн перестают зависеть от поляризации излучения. Благодаря точности, высокой чувствительности и неразрушающему воздействию эллипсометрия получила широкое применение в полупроводниковой промышленности. В области многослойных покрытий эллипсометрия применяется при отработке новых технологий и исследовании параметров наносимых материалов, а также для исследования характеристик получаемых при напылении оптических покрытий (например, нахождение пор в слоях).

Эллипсометрический контроль является косвенным методом, то есть измеряемые амплитуды и фазы излучения не могут быть напрямую конвертированы в оптические характеристики покрытия, которые и определяют его возможности. Кроме того, не используя эти характеристики нельзя провести реоптимизацию дизайна покрытия (внести изменения в последующие слои покрытия) в процессе его создания при необходимости.

В связи с относительно высокой сложностью реализации эллипсометрического контроля (измерения при углах, существенно отличных от нормальных и необходимость измерения поляризации излучения), и ряда других недостатков, таких как отсутствие эффекта самокомпенсации и невозможность прямого измерения спектральных характеристик покрытия, данный метод относительно редко используется на промышленных вакуумных установках для измерения толщин наносимых многослойных оптических покрытий в реальном времени. Кроме того, реализация данного метода контроля крайне затруднительна на существующих вакуумных установках (например, «ВУ-2М» и аналоги), в связи с чем, эллипсометрический метод контроля не рассматривается в данной работе.

Оптический (фотометрический и спектральный) контроль

Среди существующих методов контроля нанесения оптических покрытий для большинства задач наиболее точными, надёжными и универсальными являются методы *оптического (спектрального)* контроля [8; 10; 16], поскольку в

ходе нанесения материала измеряется и отображается непосредственно требуемая спектральная характеристика покрытия.

Суть этих методов заключается в том, что на контрольную подложку с наносимым покрытием падает излучение от источника, а прошедшее или отражённое излучение регистрируется. Проводя калибровку полученных данных, определяют коэффициент пропускания или отражения подложки с нанесёнными слоями с целью измерения их толщины в реальном времени. Необходимо отметить, что в отличие от рабочих подложек, на которые наносится целевое покрытие, поверхности контрольной подложки обычно делают плоскими, чтобы исключить деформацию падающего излучения.

Общая схема системы оптического контроля представлена на Рисунке 2, где слева (2а) показана работа с регистрацией спектров прошедшего излучения, а справа (2б) – отражённого. Излучение из источника 1 вводится в вакуумную камеру 2, где расположены испарители материалов с различными показателями преломления 3а и 3б, и падает на поверхность контрольной подложки 4. Также в камере находятся рабочие подложки 5, и могут находиться дополнительные контрольные подложки 6, недоступные для нанесения материала. Отражённое или прошедшее излучение через контрольную подложку попадает в спектрометр 7 для расчёта коэффициентов пропускания или отражения подложки с наносимым покрытием.

Оптический контроль превосходит кварцевый по точности определения как физической, так и, что более важно, оптической толщины контролируемого слоя [21]. Кроме того, он позволяет с высокой точностью определять оптическую толщину слоя даже в ситуациях, когда показатель преломления слоя известен не точно, а измеренные данные имеют систематические ошибки [10]. Применение методов оптического контроля позволяет использовать эффект самокомпенсации ошибок измерения толщины текущего слоя за счёт толщин последующих слоёв [8; 11; 65]. Эффекту самокомпенсации может сопутствовать негативный эффект

кумулятивного накопления ошибок в толщинах слоёв [53; 66], однако известны пути его уменьшения [67; 68].

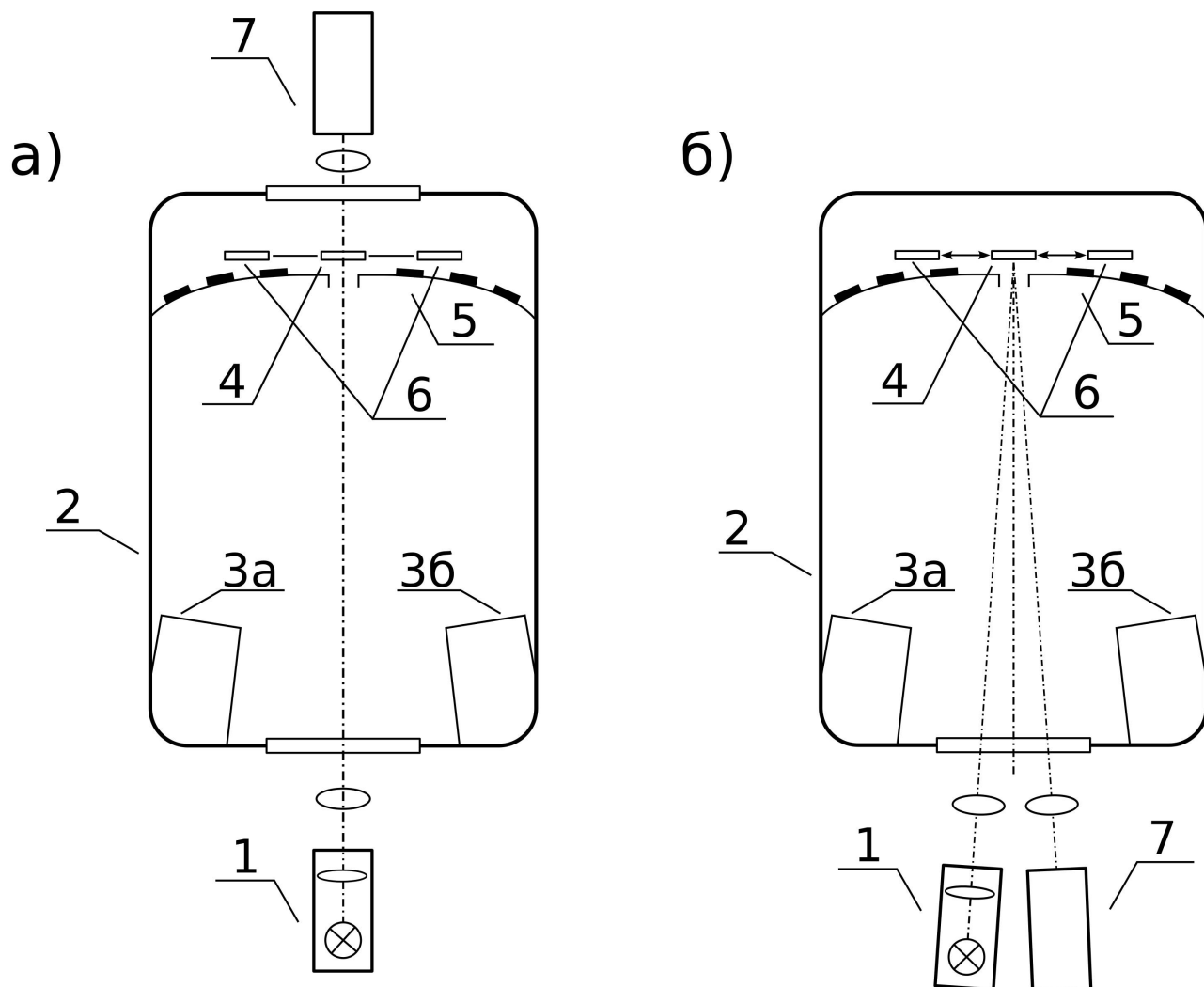


Рисунок 2 – Схемы контроля по спектрам пропускания (а) и отражения (б).
 1 – источник излучения, 2 – вакуумная камера, 3а и 3б – испарители материала,
 4 – контрольная подложка, 5 – рабочие подложки,
 6 – дополнительные контрольные подложки, 7 – спектрометр

Кроме того, для создания оптических фильтров методы оптического контроля являются наиболее наглядными, поскольку при контроле такими методами измеряется основная характеристика получаемых фильтров – спектры пропускания или отражения в реальном времени в процессе нанесения. Кроме того, в случае обнаружения каких-либо спектральных отклонений от плана можно исправить или уменьшить получаемые погрешности в толщинах слоёв за счёт изменения (реоптимизации) дизайна покрытия в отношении оставшихся не

нанесённых слоёв [8; 69; 70; 71]. Первая промышленная система с поддержкой реоптимизации была представлена в 2000-м году [72].

Комбинированные варианты контроля

Применение методов оптического контроля не исключает возможности одновременно с ними использовать методы неоптического контроля. Совместный контроль называют комбинированным. Например, совмещение оптического контроля по спектрам пропускания и контроля с помощью кварцевого сенсора представлено в работах [31; 62]. Применение нескольких вариантов измерения может позволить добавить сложную логику определения момента окончания слоя и снизить погрешности толщин получаемых слоёв [25].

Кроме того, существуют комбинированные методы контроля с несколькими детекторами излучения, например, в работе [26] рассматривается прямой оптический контроль по спектрам пропускания с помощью линейки фотодетекторов совместно с фотоэлектронным умножителем (ФЭУ) для контроля на разных длинах волн. Комбинированные методы контроля позволяют получать интересные варианты лабораторных решений, однако, комбинированный контроль, редко используется в серийных установках, где достаточным является использование точного и наглядного оптического контроля.

Выводы

На основании изложенного можно кратко перечислить основные достоинства и недостатки методов оптического контроля, которые для прецизионных задач могут являться определяющими:

Достоинства методов оптического контроля:

1. измерение усреднённой оптической толщины слоя в реальном времени с малой погрешностью (менее 0,1 нм) даже в случаях, когда показатель преломления материала известен с относительно высокой погрешностью;

2. измерение в реальном времени скорости нанесения материала в единицах оптической толщины;
3. эффект самокомпенсации погрешностей в слоях покрытия;
4. выше наглядность;
5. возможность проведения реоптимизации покрытия с целью компенсации ошибок.

Недостатки методов оптического контроля:

1. относительная сложность реализации;
2. материалы должны обладать достаточной прозрачностью в области контроля.

Совокупность данных качеств делает методы оптического (спектрального) контроля уникальными: более точными, наглядными и универсальными в сравнении с методами неоптического контроля (по времени нанесения, с помощью кварцевого датчика-резонатора и другими). В дальнейшем в данной главе будут рассматриваться методы оптического контроля процесса нанесения.

1.2 Методы оптического контроля по спектрам отражения и пропускания

При использовании оптического контроля возможно применение различных оптических схем. Так, на Рисунке 2 представлены два варианта оптических систем спектрального контроля: а) – по прошедшему излучению, б) – по отражённому излучению. Также возможно и одновременное измерение прошедшего и отражённому излучения. Таким образом, на основании выбора оптической схемы можно разделить методы оптического контроля на:

1. контроль по спектрам пропускания;
2. контроль по спектрам отражения;
3. одновременный контроль по спектрам пропускания и отражения.

Метод контроля по спектрам пропускания является более простым в реализации, поскольку в этом случае, во-первых, источник излучения и приёмник (спектрометр) устанавливаются с разных сторон от контрольной подложки, и излучение от источника может падать на неё под прямым углом, во-вторых, не требуется высокой точности ориентирования поверхности контрольной подложки относительно направления падения излучения. Из-за этого большинство существующих систем оптического контроля на вакуумных установках работают по спектрам пропускания.

Метод контроля по спектрам отражения сложнее в реализации. Во-первых, источник излучения и приёмник (спектрометр) расположены с одной стороны контрольной подложки, что требует либо применения полупрозрачного зеркала, чтобы элементы системы не мешали друг другу, либо работы системы при непрямом угле падения и отражения от контрольной подложки. Если излучение источника падает на подложку под углом, отличным от прямого, то это обстоятельство требуется учитывать в виде небольших поправок в расчётах, связанных с оптической толщиной измеряемого слоя, и может потребоваться учитывать поляризацию излучения. Если же для разделения излучения в схеме применяется полупрозрачное зеркало (светоделитель), то происходит нежелательная потеря светосилы, а при калибровке и расчётах требуется учитывать спектральные характеристики светоделиителя. Во-вторых, необходимо с достаточно высокой точностью юстировать источник излучения, поверхность контрольной подложки и приёмник излучения, чтобы отражённое от контролируемой поверхности излучение было зарегистрировано.

Для диэлектрических покрытий коэффициенты поглощения материалов, как правило, малы, и эффектом поглощения излучения в диэлектрических слоях зачастую можно пренебречь. В этом случае коэффициенты отражения и пропускания подложки с покрытием в сумме равны 100 %, и можно ожидать, что контроль по спектрам пропускания и отражения будут давать одинаковые

результаты. Однако давайте подробно рассмотрим применимость обоих подходов на примерах.

Контроль одного слоя

Для начала рассмотрим возможность измерения толщины одного слоя из одного материала, наносимого на подложку. Данный случай является особенно важным, поскольку при непрямом оптическом контроле, который будет рассмотрен позже, зачастую измеряется толщина одного слоя на дополнительной контрольной подложке. При этом толщина такого слоя может быть существенно больше, чем толщина любого из слоёв покрытия. В качестве приёмника излучения рассмотрим спектрометр на основе линейки фотодетекторов, что в настоящее время является самым распространённым вариантом в современных системах широкополосного контроля. Фотодетекторы линейки характеризуются динамическим диапазоном контроля, под которым будем понимать отношение максимального и минимального значения сигнала, которые возможно одновременно измерить. Например, для спектрометра «Колибри-2» динамический диапазон составляет 10^4 [73].

На Рисунке 3а представлены спектры пропускания и отражения слоя толщиной 2000 нм из материала MgF_2 на подложке Schott BK7 в спектральном диапазоне 500 – 1000 нм при нормальном угле падения неполяризованного излучения. Материал MgF_2 имеет относительно низкий показатель преломления (в данном спектральном диапазоне $\sim 1,385$) и широко применяется при создании многослойных диэлектрических покрытий [74; 75]. Для других толщин слоя принципиально спектры не изменятся, поскольку с ростом толщины слоя происходит увеличение количества осцилляций в коэффициентах отражения и пропускания, а амплитуды осцилляций продолжают лежать в том же диапазоне значений. Сумма интенсивности прошедшего и отражённого излучения на Рисунке 3а равна 100 %, что соответствует полному отсутствию поглощения материала в данном спектральном диапазоне. Предположим, что перед началом нанесения слоя был выбран оптимальный диапазон измерения интенсивности

путём увеличения мощности источника или изменения времени экспозиции фотодетектора, так, чтобы динамический диапазон спектрометра соответствовал всему диапазону интенсивностей регистрируемых спектров оптимальным образом.

В случае оптического контроля данного слоя по спектрам пропускания необходимо измерять интенсивности спектров пропускания в интервале 0 – 99 %, а полезный сигнал при этом будет находиться лишь в интервале 96 – 99 %, что составляет около 3 % от всего диапазона измерения (Рисунок 3а, красный график). Такое неоптимальное измерение полезного сигнала эквивалентно уменьшению динамического диапазона спектрометра в приблизительно 30 раз. В случае оптического контроля по спектрам отражения необходимо измерять интенсивности спектров отражения в интервале 0 – 5 %, который легко увеличить до всего диапазона регистрации спектрометра 0 – 100 % увеличением интенсивности излучения источника или времени экспозиции линейки фотодетекторов, при этом полезный сигнал будет занимать бóльшую часть диапазона измерения (Рисунок 3б, синий график).

Таким образом, для контроля одного слоя эффективный динамический диапазон спектрометра при контроле по спектрам пропускания будет меньше в 20 раз, чем по спектрам отражения, что неизбежно ухудшит отношение сигнал/шум в регистрируемых спектрах.

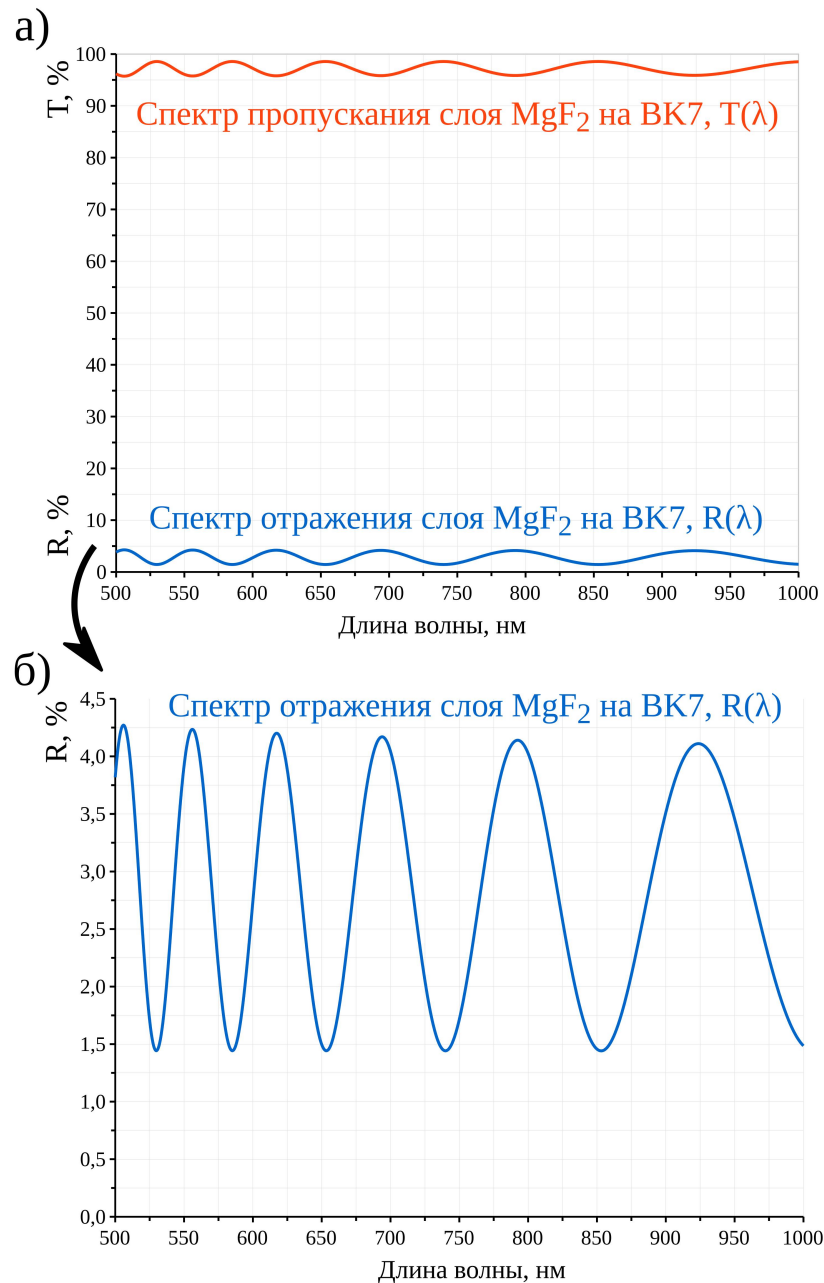


Рисунок 3 – Спектры пропускания и отражения слоя толщиной 2000 нм из материала MgF_2 на подложке BK7 в спектральном диапазоне 500 – 1000 нм при нормальном угле падения неполяризованного излучения:

а) – в диапазоне 0 – 100 %, б) – в диапазоне 0 – 4,5 %

Для других материалов ситуация будет аналогичная, разница лишь в том, насколько уменьшается эффективный динамический диапазон в случае контроля по спектрам пропускания в сравнении с контролем по спектрам отражения. Так для материалов с высоким показателем преломления амплитуда регистрируемых спектров увеличивается, и разница между методами контроля уменьшается,

например, для материала TiO_2 (показатель преломления $\sim 2,28$) на подложке BK7 уменьшение эффективного динамического диапазона происходит в 4 раза (Рисунок 4а). Для материала SiO_2 с относительно низким показателем преломления ($\sim 1,45$) на подложке BK7 – разница составит 12 раз (Рисунок 4б), также в пользу метода контроля по спектрам отражения.

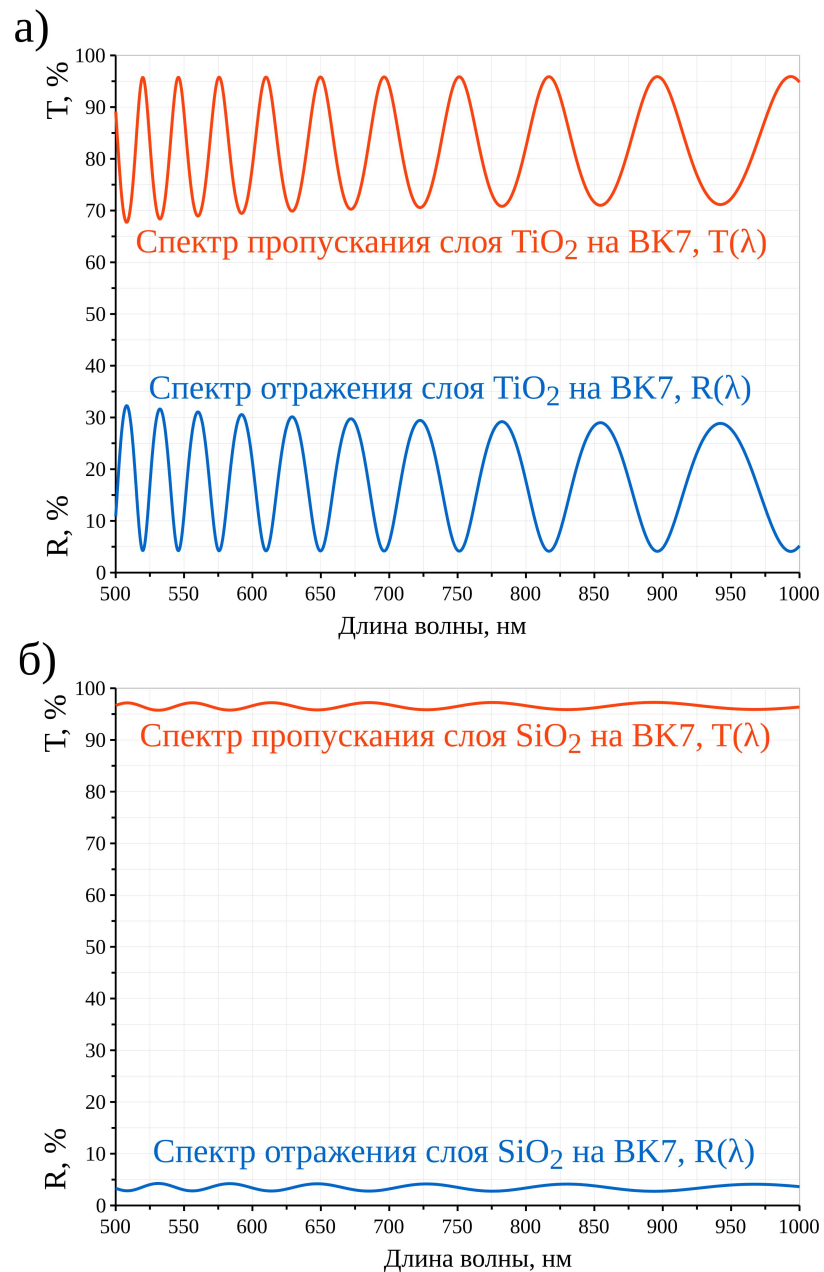


Рисунок 4 – Спектры пропускания и отражения слоя толщиной 2000 нм на подложке BK7 в спектральном диапазоне 500 – 1000 нм при нормальном угле падения неполяризованного излучения:
а) – для материала TiO_2 , б) – для материала SiO_2

Контроль многослойных покрытий

Рассмотрим контроль нанесения многослойного покрытия на примере с просветляющего покрытия (Anti-Reflection фильтра), поскольку это наиболее распространённый тип фильтров, занимающий более половины существующего рынка многослойных покрытий [76]. Спектральный диапазон контроля и рабочий спектральный диапазон покрытия в общем случае могут быть различны, но, как правило, они существенно пересекаются. В этом случае к моменту нанесения последних слоёв просветляющего покрытия регистрируемые спектры отражения могут иметь малые значения интенсивности (например, коэффициент отражения менее 1 %) почти во всём диапазоне контроля. На Рисунке 5а представлены характерные спектры отражения и пропускания просветляющего покрытия перед окончанием нанесения последнего слоя. Данное покрытие рассчитано для работы в диапазоне 400 – 1500 нм и состоит из 35 слоёв TiO_2 и SiO_2 на подложке BK7.

В случае оптического контроля по спектрам пропускания в спектральном диапазоне 500 – 1000 нм измеряемые значения лежат в интервале 0 – 100 %, а полезный сигнал составляет менее 1 % от максимума. То есть в этом случае фактически не используется 99 % динамического диапазона спектрометра, что эквивалентно уменьшению этого диапазона в 100 раз с соответствующим ухудшением отношения сигнал/шум во всей области контроля. Если же используется оптический контроль по спектрам отражения (Рисунок 5б), то полезный сигнал составляет приблизительно четверть от диапазона измерения с учётом возможности увеличения интенсивности источника излучения или времени экспозиции. Это значит, что в случае контроля по спектрам пропускания эффективный динамический диапазон для измерения полезного сигнала будет в 25 раз меньше, чем для контроля по спектрам отражения.



Рисунок 5 – Спектры отражения и пропускания просветляющего покрытия (Anti-Reflection фильтра) для работы в диапазоне 400 – 1500 нм перед окончанием нанесения последнего слоя:
а) – в диапазоне 0 – 100 %, б) – в диапазоне 0 – 1 %

В случае создания зеркал, ситуация обратная. Однако создание зеркал не только является менее распространённой задачей, но и сама технология создания зеркал с многослойными диэлектрическими покрытиями значительно проще, так как такие зеркала создаются в основном для использования в составе лазеров, спектральный диапазон которых значительно уже диапазона современных

просветляющих покрытий. Поэтому при их создании, как правило, применяются конфигурации покрытия из четвертьволновых слоёв, которые допускают большие погрешности измерения толщин из-за сильного эффекта самокомпенсации ошибок [61]. На основании этого, можно сделать вывод, что, применяя метод прямого оптического контроля для решения наиболее распространённых и достаточно сложных задач создания просветляющих покрытий, составляющих большинство от всех востребованных фильтров, предпочтительно регистрировать спектры отражения, а не пропускания, поскольку это существенно повышает отношение сигнал/шум в регистрируемых спектрах.

Одновременный контроль по отражённому и прошедшему излучению

Метод одновременного контроля по спектрам пропускания и отражения обладает достоинствами обоих методов, но для большинства задач не существенно отличается от метода контроля по спектру отражения. Исключение составляют задачи, где требуется определение коэффициентов *поглощения* материалов в регистрируемом спектральном диапазоне, поскольку отражённое от диэлектрических плёнок излучение почти не чувствительно к поглощению материала. Однако на практике поглощение в диэлектрических плёнках является очень тонким эффектом, и его зачастую не удаётся измерить с приемлемой точностью, даже измеряя одновременно пропускание и отражение плёнки. В связи с этим применение одновременного контроля по отражённому и прошедшему излучению, как правило, не требуется и не используется в современных системах контроля.

Выводы

Несмотря на более сложную реализацию, контроль по спектрам отражения имеет преимущества по отношению к контролю по спектрам пропускания: более эффективно используется динамический диапазон спектрометра, что приводит к увеличению отношения сигнал/шум в регистрируемых спектрах. Этот вывод применим как в случае контроля одного слоя произвольной толщины, так и случае

контроля наиболее распространённых спектральных фильтров – просветляющих покрытий.

1.3 Методы широкополосного и монохроматического контроля

Методы оптического контроля можно классифицировать по спектральной области контроля. Так, спектральный контроль может вестись:

1. на одной длине волны (монохроматический контроль),
2. на нескольких длинах волн,
3. в широком спектральном диапазоне (широкополосный контроль).

Монохроматический контроль

Первые работы, посвящённые изучению метода монохроматического контроля при нанесении многослойных покрытий, были опубликованы в конце 70-х, начале 80-х годов [11; 14], и с тех пор данный метод получил широкое распространение [13; 15]. Метод заключается в том, что отражённое или пропущенное через подложку с покрытием монохроматическое излучение попадает на фоточувствительный сенсор, который измеряет коэффициент пропускания/отражения на одной длине волны. Для проведения контроля формируют последовательность контрольных длин волн для всех слоёв покрытия и соответствующую последовательность значений пропускания или отражения, на момент окончания нанесения слоя.

При монохроматическом контроле широко применяется *метод поворотной точки* («turning point monitoring method», «ТРМ») [77; 78] для определения момента, когда следует прервать нанесение слоя. Метод поворотной точки особенно успешно применяется для монохроматического контроля четвертьволновых слоёв [9], однако может применяться и для контроля других

покрытий путём перестроения длины волны контроля [13]. На Рисунке 6 представлена схема монохроматического контроля методом поворотной точки.

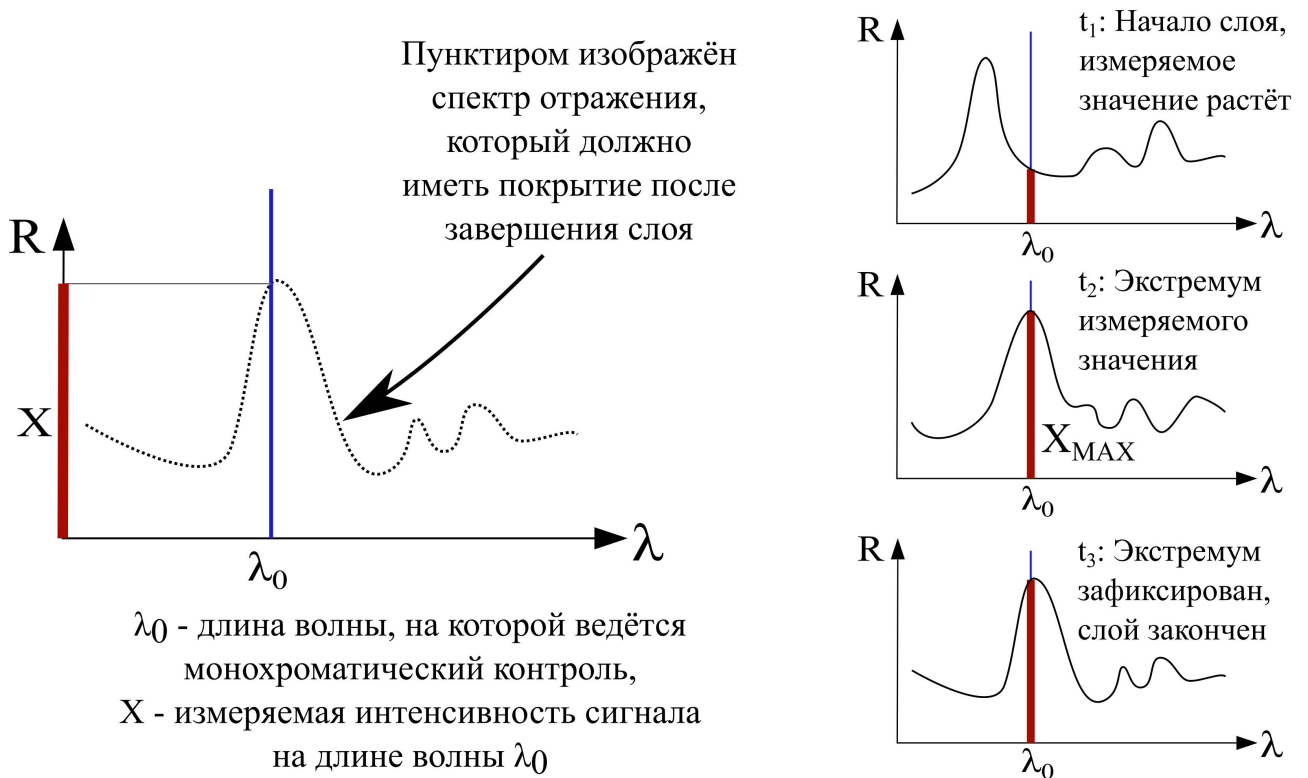


Рисунок 6 – Монохроматический контроль нанесения методом поворотной точки

Перед нанесением очередного слоя или всего покрытия осуществляют решение прямой задачи многослойных покрытий – находят коэффициент отражения или пропускания покрытия на момент окончания нанесения каждого слоя [12; 66]. На Рисунке 6 слева пунктиром показан спектр отражения, который должно иметь покрытие по окончании нанесения очередного слоя. Далее в этом спектре ищут экстремумы и соответствующие им длины волн. Монохроматором или другим способом выставляют длину волны контроля λ_0 в окрестность одного из экстремумов: либо непосредственно в положение экстремума, либо с небольшой отстройкой, для того, чтобы достоверно определить прохождение экстремума [79]. Прекращают нанесение слоя в тот момент, когда измеряемый сигнал в коэффициенте отражения или пропускания на выбранной длине волны достигает экстремума, что говорит о нанесении необходимой толщины слоя. Достоинствами контроля методом поворотной точки является простота его

реализации и то, что при его применении работает механизм самокомпенсации ошибок в толщинах слоёв многослойных покрытий [8; 80]. Другой метод монохроматического контроля использует остановку нанесения слоя по экстремуму производной коэффициента отражения или пропускания по времени на измеряемой длине волны [81]. Данный метод называется методом контроля *на основе выбора наиболее чувствительной длины волны* и во многих случаях является более точным, чем метод поворотной точки [82; 83].

В настоящее время метод монохроматического контроля благодаря простоте реализации является самым распространённым среди методов оптического контроля. В частности, такой метод широко используется в системах контроля, предлагаемых крупными производителями вакуумных установок [34; 35; 40; 84; 85; 86].

Одним из недостатков монохроматического контроля является необходимость формирования списка контрольных длин волн и необходимость проводить перестройку прибора между нанесением слоёв, что является существенным источником дополнительных погрешностей в итоговых толщинах слоёв. Кроме того, монохроматический контроль не учитывает искажения оптических характеристик покрытия на разных участках спектра. Эти искажения неизбежны, из-за невозможности с высокой точностью знать и поддерживать постоянным показатель преломления наносимых материалов во всём рабочем диапазоне длин волн. Как результат, монохроматический контроль хорошо подходит в первую очередь для покрытий, которые планируется применять на одной длине волны, а для широкополосных фильтров, которые должны работать в широком спектральном диапазоне, могут быть существенные отклонения итоговых характеристик от ожидаемых.

Контроль на нескольких длинах волн

Вариацией метода монохроматического контроля является метод контроля на нескольких длинах волн. Такой метод позволяет вести контроль точно так же,

как в монохроматическом случае, но контролировать при этом экстремумы в двух или более точках спектрального диапазона. Это позволяет заметить несоответствия сигналов на разных длинах волн и уменьшить связанные с этим накапливаемые ошибки (например, как в работе [16]) или уменьшить количество перестроек контрольных длин волн между нанесением разных слоёв (например, как в работе [17]). Примером вакуумных установок, оснащённых системой с таким методом контроля, могут служить установки «OMS 5000» компании «Bühler Holding AG» (ранее «Leybold Systems»).

При контроле на нескольких длинах волн так же, как и при монохроматическом, применимы методы поворотной точки и выбор наиболее чувствительной длины волны. Кроме того, известен критерий остановки нанесения слоя при достижении одинаковых значений регистрируемых сигналов на разных длинах волн.

Широкополосный контроль

Широкополосный контроль, который проводится по спектру отражения или пропускания в широком спектральном диапазоне, является следующим шагом в развитии технологий нанесения многослойных оптических покрытий. Пионерские работы по данному методу были опубликованы уже в конце 70-х годов [11; 18; 22]. При широкополосном контроле, также, как и при монохроматическом, существуют эффект самокомпенсации ошибок измерения толщины текущего слоя за счёт толщин последующих слоёв [87; 88] и эффект кумулятивного накопления ошибок [53].

Использование техник монохроматического контроля доступно и при широкополосном контроле. В то же время широкополосный контроль лишён некоторых недостатков монохроматического контроля и контроля на нескольких длинах волн. Так, для него не требуется формировать списки контрольных длин волн и осуществлять перестройку каких-либо длин волн между нанесением

разных слоёв, что убирает один из источников дополнительных погрешностей в итоговых толщинах слоёв.

Кроме того, методы широкополосного контроля являются более наглядным, поскольку спектры пропускания или отражения, которые являются основной характеристикой изготавливаемых фильтров, измеряются в реальном времени во всём спектральном диапазоне контроля. Благодаря этому, при широкополосном контроле легко обнаруживаются грубые ошибки нанесения, например, связанные с неправильным порядком слоёв или наносимым материалом, что предотвращает порчу покрытия.

В случае широкополосного контроля измеряют большое количество точек (как правило, от сотен до тысяч), благодаря чему становится возможным статистически *снизить погрешности измерения толщин слоёв*. Кроме того, в случае обнаружения спектральных отклонений от расчёта, ситуацию можно исправить путём реоптимизации – внесения изменений в последующие слои покрытия, тем самым уменьшая итоговое отклонение спектральных характеристик получаемых фильтров от расчётных [8; 69; 70; 71].

Множество авторов показали огромный потенциал метода широкополосного контроля для изготовления различных видов оптических покрытий и продемонстрировали результаты применения метода на практике [19; 20; 21; 27; 28; 29; 30; 31; 32]. 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 [33; 34; 35; 36; 37; 38; 39; 40; 41; 42; 43]. В Российской Федерации разработка систем контроля в широкой спектральной области долгое время не проводилась, и, как результат, преимущественно используются системы контроля зарубежного производства.

Выводы

Метод широкополосного контроля является предпочтительным в сравнении с монохроматическим и контролем на нескольких длинах волн, поскольку обладает рядом важных достоинств:

1. более низкая погрешность измерения толщин слоёв;
2. контроль характеристик фильтра в широком диапазоне длин волн;
3. наглядность, возможность избежать грубых ошибок и брака;
4. возможность изменения дизайна покрытия (реоптимизации) в процессе нанесения покрытия с целью компенсации ошибок в толщинах слоёв.

1.4 Методы прямого и непрямого оптического контроля

Для оптического контроля толщин слоёв многослойных покрытий могут применяться методы прямого и непрямого контроля. В обоих случаях анализируется прошедшее или отражённое излучение от контрольной подложки, на которую происходит нанесение материала. Однако в случае прямого контроля в качестве контрольной подложки используется подложка, содержащая целевое покрытие, а в случае непрямого контроля используются дополнительные контрольные подложки. В литературе для таких подложек также применяется термин «подложка-свидетель» по аналогии с английским термином «*witness substrate*» [1; 52].

Прямой оптический контроль

При создании покрытия в вакуумной камере расположены рабочие подложки, на которые требуется нанести необходимое покрытие, и контрольная подложка, на которую падает излучение от источника системы контроля.

Спектр излучения, отражающегося от контрольной подложки (или проходящего через неё), регистрируется для определения коэффициента отражения (или пропускания) покрытия. Нанесение на контрольную подложку

первого и последующих слоёв происходит так же, как и на рабочие подложки. В результате, конфигурация слоёв на контрольной и на рабочих подложках получается одинаковая, как и их спектры отражения и пропускания (спектры могут незначительно отличаться, если отличается материал рабочих и контрольных подложек). На Рисунке 7 изображены подложки с конфигурациями слоёв в разные моменты времени при создании фильтра на примере нанесения дихроичного зеркала. Справа на Рисунке 7 представлены коэффициенты отражения контрольной подложки, получаемые методом прямого оптического контроля по спектрам отражения. Моменты времени на Рисунке 7 следующие:

- а) окончание первого слоя из материала 1, толщины d_1 ;
- б) окончание второго слоя из материала 2, толщины d_2 ;
- в) окончание N-го слоя из материала 1, толщины d_N ;
- г) пример излишнего нанесения материала 1, N-й слой имеет толщину $d_N + \Delta d$, где Δd – неприемлемо высокая погрешность нанесения слоя.

Из Рисунка 7 видно, что измеряемые коэффициенты отражения для N-го слоя расчётной (требуемой) толщины и толщины с существенным излишним нанесением материала могут быть очень похожи. Это связано с тем, что коэффициент отражения формируется всеми слоями, и чем ближе покрытие к завершению, тем, как правило, меньше разница между коэффициентами отражения разных толщин наносимого слоя (для пропускания ситуация аналогичная). В этом случае, изменение коэффициентов отражения или пропускания во времени при нанесении слоя может быть настолько мало, что будет сопоставимо с шумами линейки фотодетекторов спектрометра. Тогда система контроля не сможет корректно определить толщину слоя и выбрать момент, когда нужно прекратить нанесение очередного слоя.

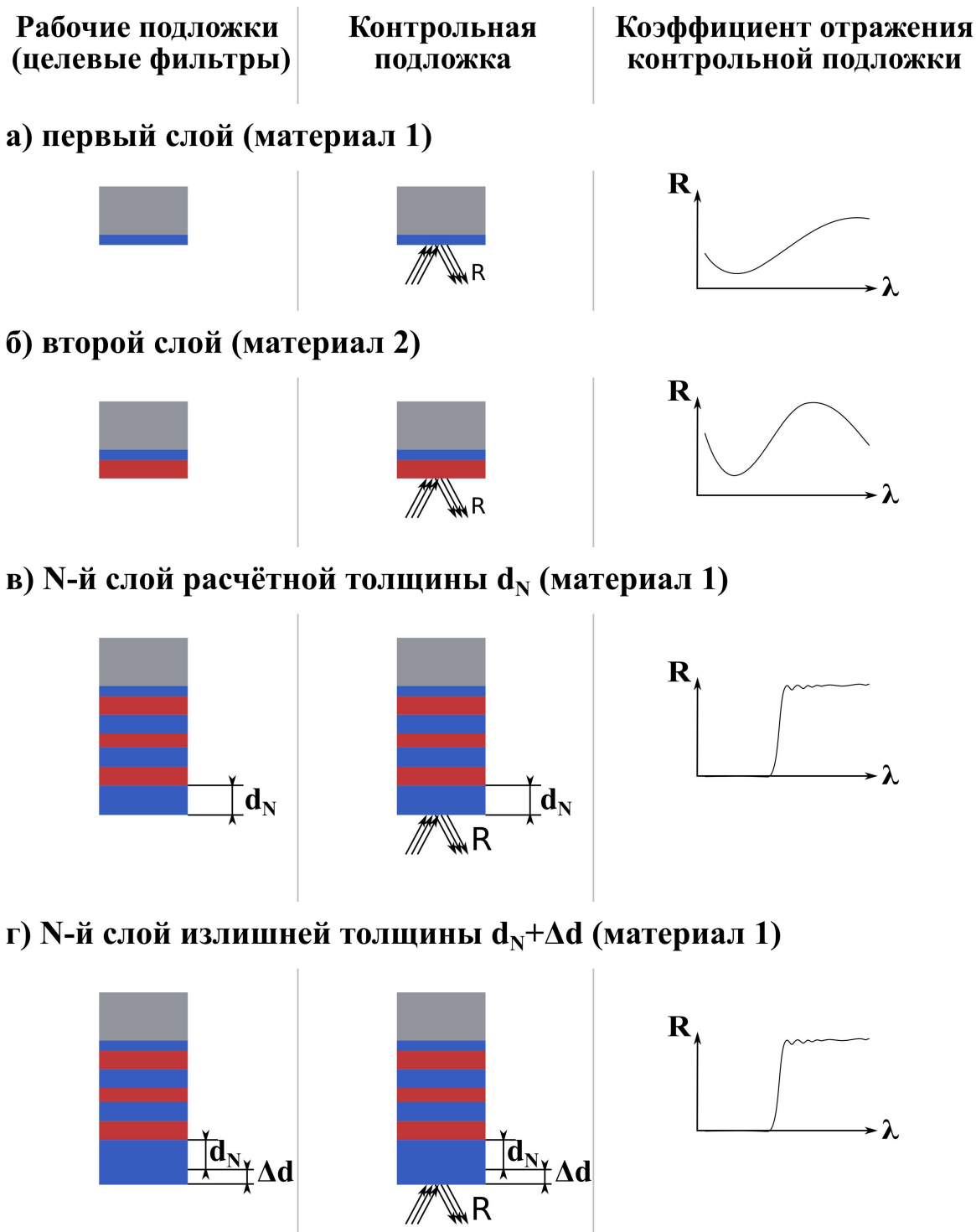


Рисунок 7 – Схема прямого оптического контроля нанесения
отрезающего фильтра в различные моменты времени:

- а) окончание первого слоя, б) окончание второго слоя,
в) окончание N-го слоя, г) излишнее нанесение материала на N-й слой

Кроме того, для некоторых фильтров в коэффициенте отражения или пропускания может не быть явно выраженных экстремумов в спектральной области контроля, что дополнительно увеличит погрешность определения

толщины слоя. Такая ситуация часто происходит со стартовыми тонкими слоями, где толщина слоя может быть недостаточной для появления экстремумов или точек перегиба, что приводит к многократному росту погрешности определения толщины. Из этого следует важный недостаток прямого контроля – существенная зависимость погрешности определения толщин слоёв от конфигурации создаваемого фильтра.

Достоинствами прямого оптического контроля являются его наглядность (при нанесении слоя можно в реальном времени наблюдать коэффициенты отражения или пропускания создаваемых фильтров) и наличие эффекта самокомпенсации ошибок измерения толщины текущего слоя за счёт толщин последующих слоёв

Непрямой оптический контроль

Метод непрямого оптического контроля является более универсальным и осуществляется по двум и более вспомогательным контрольным подложкам, на каждую из которых наносится только один материал [78]. При нанесении каждого слоя только одна контрольная подложка находится в камере открытой для осаждения материала, а остальные – скрыты. Перед созданием покрытия его конфигурацию разбивают на дополнительные контрольные подложки, например, как изображено на Рисунке 8. В этом случае на каждую контрольную подложку наносится только один материал, формируя один «большой» слой, и спектр отражения такого слоя имеет характерный гармонический вид (особенно в координатах длин волн $1/\lambda$).

Становится понятна важность сравнения методов контроля по спектрам отражения и пропускания для толстого слоя из одного материала, изложенная в параграфе 1.2, поскольку именно этот случай имеет место при непрямом контроле. Как было показано, контроль по спектрам отражения для непрямого контроля является предпочтительным, поскольку позволяет более эффективно

использовать динамический диапазон спектрометра и в разы увеличить отношение сигнал/шум в регистрируемых и анализируемых спектрах.

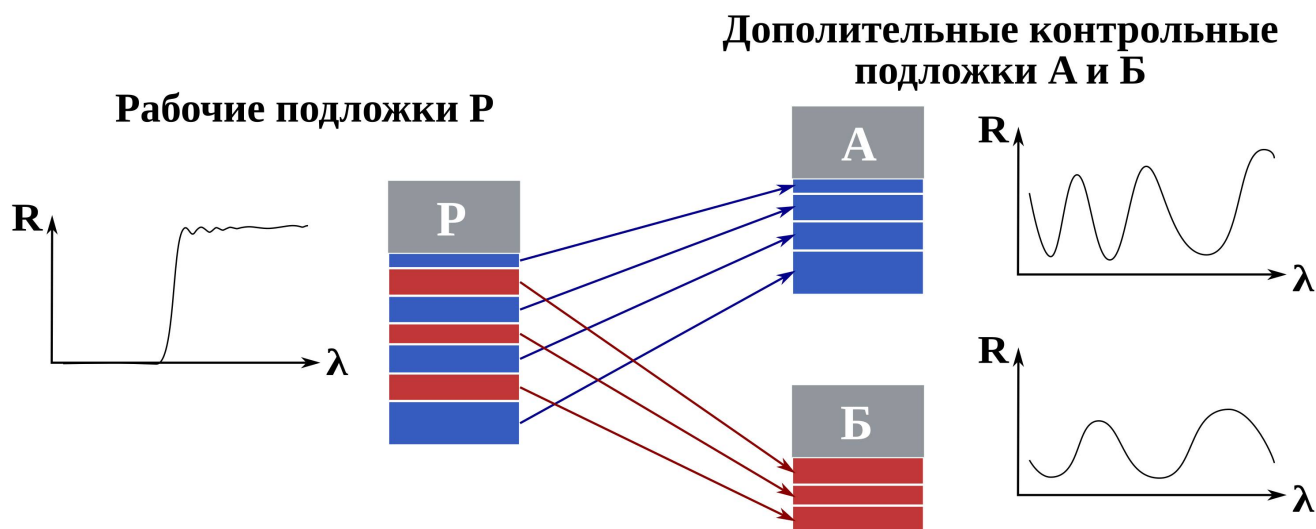


Рисунок 8 – Разбиение слоёв целевого покрытия на дополнительные контрольные подложки в случае непрямого оптического контроля, синим и красным цветом обозначены два разных материала

В общем же случае разбиение слоёв покрытия можно осуществлять на более чем две контрольных подложки, вплоть до использования индивидуальной контрольной подложки для каждого слоя. В этом случае будет полностью *исключён эффект накопления ошибок*, поскольку не будет влияния предыдущих слоёв на измеряемые коэффициенты пропускания или отражения от контрольной подложки с одним единственным слоем. Возможность избежать кумулятивного эффекта накопления ошибок является важным достоинством метода непрямого оптического контроля, особенно при создании сложных многослойных разнотолщинных покрытий.

Чтобы понять другое важное отличие от прямого контроля рассмотрим на примере двух дополнительных контрольных подложек А и Б схему непрямого оптического контроля (Рисунок 9) с моментами времени, аналогичными случаю прямого контроля (Рисунок 7). Отличием является то, что в случае непрямого контроля коэффициенты отражения контролируемой подложки для толщин d_N и $d_N + \Delta d$ существенно отличаются (Рисунок 9 в и г соответственно): экстремумы и

точки перегибов в спектрах смещены, в то время как в случае прямого контроля различие незначительно.

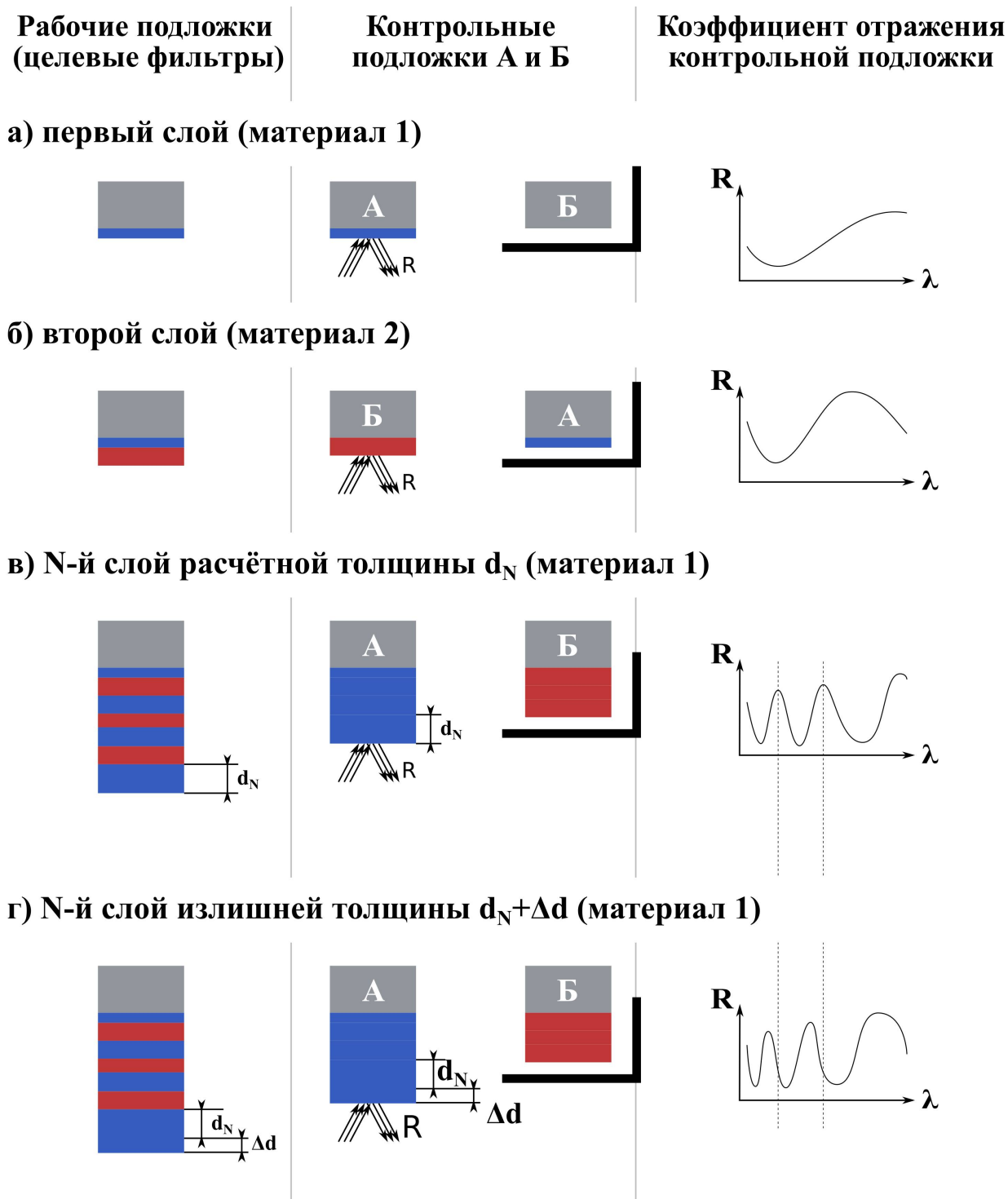


Рисунок 9 – Схема непрямого оптического контроля нанесения отрезающего фильтра в различные моменты времени:

- а) окончание первого слоя, б) окончание второго слоя,
в) окончание N-го слоя, г) излишнее нанесение материала на N-й слой

Таким образом, непрямой контроль позволяет измерять толщины с погрешностями, которые не зависят от конфигурации слоёв создаваемого фильтра, что говорит о его универсальности. В ходе нанесения покрытия любой сложности (отрезающий фильтры, AR-фильтры, зеркала и другие) положения экстремумов в измеряемых коэффициентах отражения в области контроля меняются, движутся по мере нанесения слоя, и определение толщины слоя и момента остановки нанесения возможно с высокой точностью для почти любых фильтров. Исключение составляет случаи, когда экстремумы и точки перегибов отсутствуют в спектральном диапазоне контроля, что происходит при контроле тонкого (нанометрового) стартового слоя, первого на контрольной подложке. Эта проблема рассмотрена в главе 3.

На Рисунках 7 и 9 прямой и непрямой оптический контроль сравнивались в широком спектральном диапазоне лишь для наглядности. Оба метода могут применяться для монохроматического контроля аналогичным образом. Метод непрямого оптического контроля был опубликован в конце 70-х, начале 80-х годов именно в монохроматическом виде [8]. А метод непрямого *широкополосного* контроля получил своё распространение сравнительно недавно, поскольку стало доступно оборудование для измерения и математического анализа больших спектров в реальном времени. В работе [52] авторы одними из первых решают задачу широкополосного контроля по дополнительным контрольным подложкам. За последние годы метод хорошо себя зарекомендовал и стал безальтернативным для ряда задач по созданию сложных оптических фильтров на основе многослойных диэлектрических покрытий.

Выводы

Можно сформулировать достоинства и недостатки метода непрямого контроля, которые относятся как к широкополосному, так и монохроматическому использованию.

Недостатки непрямого контроля:

- отсутствие эффекта самокомпенсации.

Достоинства непрямого контроля:

- отсутствие кумулятивного эффекта накопления ошибок в толщинах слоёв;
- универсальность (независимость от спектральной задачи);
- более низкая погрешность измерения толщины слоя.

Выводы к главе 1

Метод непрямого контроля более универсальный и точный в сравнении с методом прямого контроля, поскольку при его использовании погрешности не зависят от оптических характеристик создаваемого фильтра, а потому является предпочтительным при создании сложных многослойных разнотолщинных покрытий. Кроме того, важным преимуществом непрямого контроля является отсутствие кумулятивного эффекта накопления ошибок в толщинах слоёв.

Широкополосный контроль более сложен в реализации, чем монохроматический, однако обладает большей наглядностью, достоверностью и позволяет снизить погрешности измерения толщин слоёв благодаря большему количеству точек в регистрируемых спектрах.

В случае применения метода непрямого контроля предпочтительно использование контроля по спектрам отражения. В этом случае более эффективно используется динамический диапазон спектрометра и отношение сигнал/шум в регистрируемых спектрах отражения кратно выше в сравнении с контролем по спектрам пропускания. В случае если используемые материалы не имеют существенного поглощения или его не требуется измерять, то наряду со спектрами отражения использовать спектры пропускания не требуется.

Данные выводы и классификацию методов можно продемонстрировать в виде общей схемы, представленной на Рисунке 10.

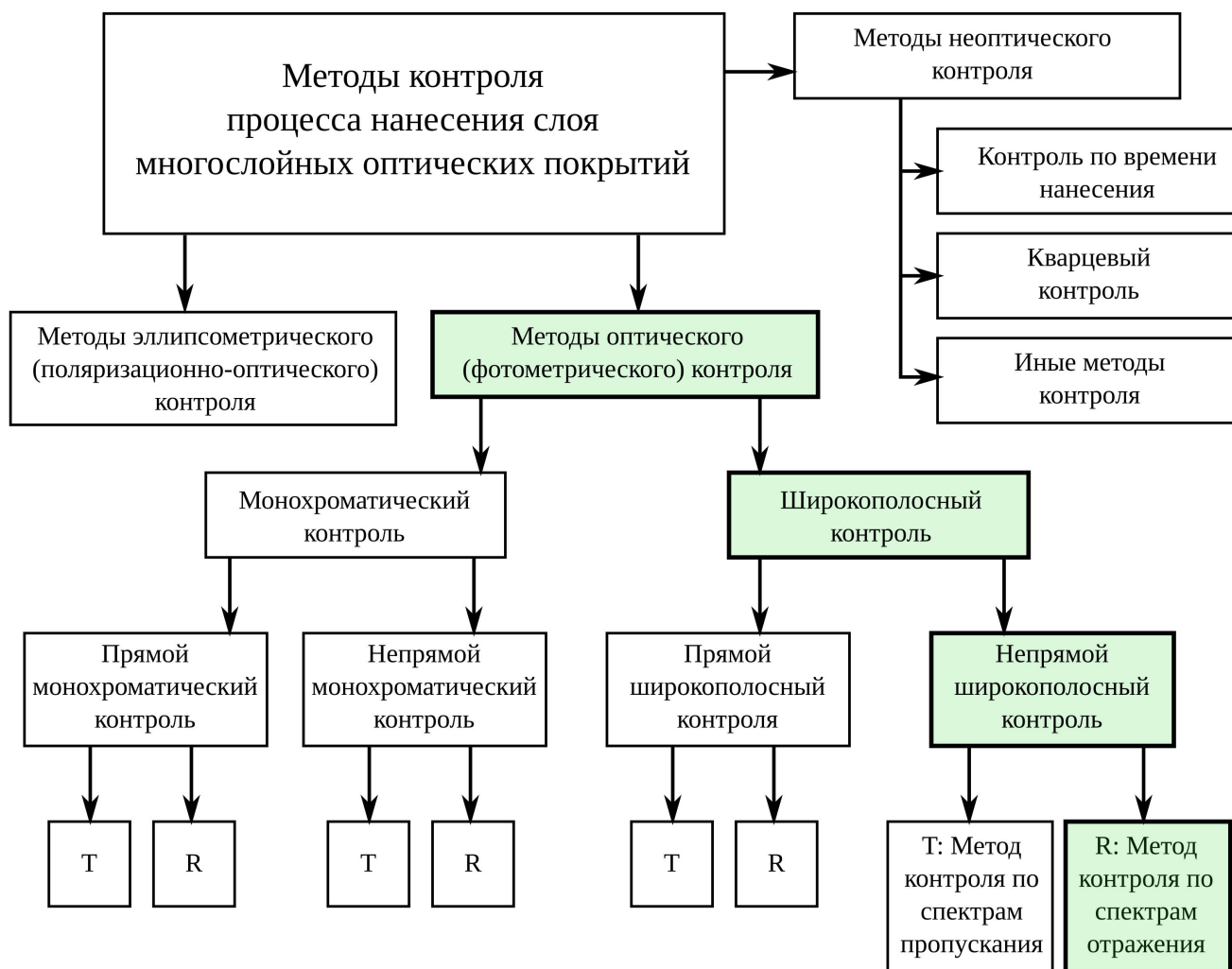


Рисунок 10 – Дерево классификации методов контроля нанесения многослойных покрытий

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 (выбор метода соответствует ветке, отмеченной зелёным цветом на Рисунке 10).

2 ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

После выбора метода контроля для разработки системы контроля необходимо было определить, из каких элементов она должна быть построена, и каковы их оптимальные характеристики. На итоговую погрешность измерения толщины слоя влияют различные факторы и характеристики использованных элементов системы: количество фотодетекторов в линейке, дрейф интенсивности источника, погрешность калибровки интенсивности и градуировки спектрометра по длинам волн и другие. Поскольку экспериментальное исследование влияния данных факторов и параметров нанесения было затруднительно или даже невозможно, то было решено провести это исследование путём компьютерного моделирования.

В настоящей главе кратко освещены механизмы расчёта прямой и обратной задач многослойных покрытий, а также рассмотрена задача синтеза покрытий путём минимизации функционала невязки. Приведён список программного обеспечения, которое осуществляет решение этих задач и причины выбора конкретного коммерческого решения.

Предложена модель вакуумной установки и системы контроля в широком спектральном диапазоне. В рамках модели приведены факторы, определяющие погрешности измерения толщины слоя покрытия. Для проведения компьютерного моделирования системы контроля в соответствии с предложенной моделью было разработано программное обеспечение. С его помощью проведено исследование влияния различных характеристик элементов системы контроля и условий нанесения покрытия на погрешности измерения толщины слоёв.

По результатам компьютерного моделирования сделаны выводы о степени важности различных характеристик элементов системы и факторов нанесения при

широкополосном оптическом контроле и даны рекомендации для снижения случайной и систематической погрешностей измерения толщин слоёв на подобных системах контроля и вакуумных установках. Показана проблема определения толщин нанометровых стартовых слоёв, связанная с неточностью контроля толщин таких слоёв из-за отсутствия экстремумов и точек перегиба в спектральной области контроля.

2.1 Перспективность компьютерного моделирования систем контроля

Применение компьютерного моделирования для исследования и поиска оптимальных характеристик компонентов для системы контроля является перспективным решением, поскольку позволяет легко менять исследуемые характеристики и осуществлять тысячи измерений для построения статистически достоверной выборки за разумные сроки. Реальные исследования такого рода затруднены, а по ряду характеристик невозможны. Так, например, изменение спектрального диапазона спектрометра возможно в ряде современных спектрометрах путём поворота дифракционной решётки, но произвольно менять количество фотодетекторов в линейке, как правило, невозможно. Также невозможно произвольно менять уровень шумов линейки фотодетекторов, включая уменьшение его до нуля. Такие же сложности могут быть с исследованием других факторов, влияющих на погрешности контроля, например, с дрейфом интенсивности источника, погрешностью калибровки спектрометра по длинам волн, погрешностями задания показателя преломления материалов и подложек. И совершенно невыполнимой кажется задача экспериментального исследования тысяч различных значений данных параметров и их комбинаций.

Моделирование активно применяется в области оптического контроля, например, для определения перспективности выбранного решения или оценки прогнозируемых погрешностей при создании спектральных фильтров на основе

многослойных покрытий. Например, в работе [89] проводится моделирование нанесения 42-слоистого холодного зеркала для демонстрации работы предложенного авторами подхода. Схожим образом в работе [70] применено моделирование случайных ошибок в толщинах и пористости слоёв покрытия для определения оптимальной стратегии контроля. В работе [16] проведено компьютерное моделирование с целью определения погрешностей монохроматического контроля и контроля на двух длинах волн. В работе [90] рассмотрены возможности внесения погрешностей в показатели преломления материалов, как случайных, так и систематических, и путём численных модельных экспериментов показано, что случайные ошибки не вносят критических погрешностей в характеристики слоёв, а систематические могут приводить к существенным погрешностям.

В работе [91] используется программный комплекс, реализованный в среде визуального программирования «LabView», для компьютерного моделирования производственного процесса создания многослойных покрытий: синтеза покрытия, выбора оптимальных стратегий контроля, формирования списка поворотных точек для монохроматического контроля и изготовления покрытий на модельной установке с заданными погрешностями измерения и нанесения толщин слоёв. Схожие функции моделирования реализованы в некоторых математических пакетах синтеза многослойных покрытий, где есть возможность произвести оценку качества получаемого фильтра с учётом прогнозируемой случайной или систематической погрешности в получаемых толщинах слоёв [51]. Однако интересный процесс нахождения этих погрешностей для модельной системы контроля с известными характеристиками её элементов и условиями нанесения, как правило, остаётся за скобками.

Исследования с помощью компьютерного моделирования с целью определения погрешностей контроля и зависимостей погрешностей от различных характеристик системы контроля почти не проводятся (или не публикуются)

производителями вакуумных установок, оснащённых системами спектрального контроля.

2.2 Программное обеспечение для решения прямых и обратных задач

До проведения компьютерного моделирования с целью исследования влияния характеристик элементов системы контроля и параметров нанесения на погрешности измерения толщин слоёв необходимо рассмотреть физические процессы при прохождении излучения через слоистые среды (многослойные фильтры) и сформулировать основные задачи, которые необходимо численно или аналитически решать в ходе моделирования широкополосного оптического контроля. Кроме того, требуется рассмотреть существующие программные библиотеки, которые можно использовать для решения этих задач в разрабатываемом моделирующем программном обеспечении.

Прямая задача многослойных покрытий

В общем случае многослойное покрытие представляет собой слоистую структуру из N слоёв, на подложке (Рисунок 11). Световая волна, падающая на такую плоскопараллельную структуру, расщепляется на каждой из границ раздела на прошедшую и отражённую волны, в результате чего внутри слоёв и в окружающих средах возникает многолучевая интерференция излучения [92]. Нахождение коэффициентов отражения и пропускания для известной конфигурации покрытия (толщин и очередности слоёв, дисперсионных характеристик материалов и подложки) под заданным углом падения и поляризации излучения называется **прямой задачей многослойных покрытий**.

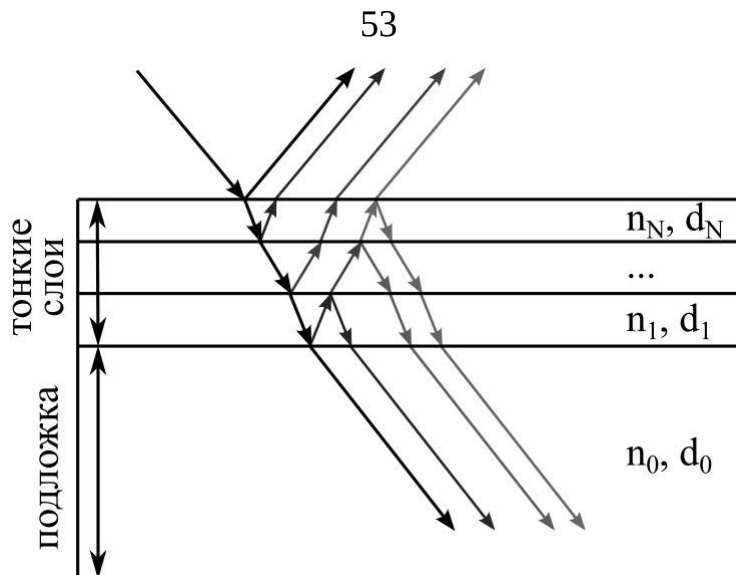


Рисунок 11 – Многослойное покрытие из N слоёв на подложке с показателем преломления n_0 . Стрелками схематически изображён ход лучей для $N = 3$

Рассмотрим физику процесса более подробно. Если на границу двух однородных и изотропных сред с разными оптическими свойствами (показателями преломления n_1 и n_2) падает плоская гармоническая электромагнитная волна (I), то она разделяется на две волны: прошедшую (T) во вторую среду (преломлённую) и отражённую (R) (Рисунок 12). Существование и единственность волн R и T вытекает из граничных условий уравнений Максвелла [63].

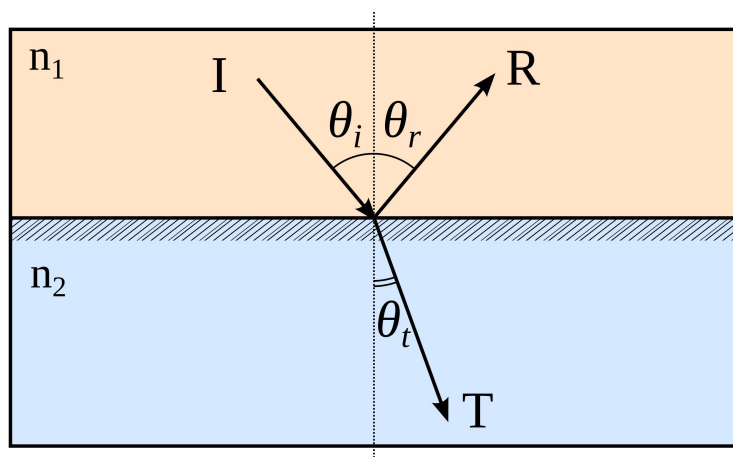


Рисунок 12 – Плоская волна, падающая на границу двух сред с показателями преломления n_1 и n_2 , где углами θ_i , θ_r и θ_t обозначены отложенные от нормали углы для падающей, отражённой и прошедшей волн соответственно

Прошедшее излучение в случае изотропных сред и плоских волн распространяется в соответствии с законом Снеллиуса (2), а отражённое излучение в соответствии с законом отражения (3).

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t \quad (2)$$

$$\theta_i = \theta_r \quad (3)$$

Для простоты предположим, что обе среды (однородные и изотропные) обладают нулевой проводимостью и совершенно прозрачны, а их магнитные проницаемости фактически отличаются от единицы на пренебрежимо малые величины, и положим $\mu_1 = \mu_2 = 1$. Такое приближение с высокой точностью применимо к многослойным диэлектрическим покрытиям, в том числе применяемым для видимого диапазона длин волн. Амплитуды Т и R волн, в отличие от направления их распространения, зависят от поляризации падающего излучения, поэтому для расчёта произвольно поляризованного излучения требуется разложить падающую волну на s и p поляризованные составляющие. Для падающих волн с s и p поляризацией амплитуды соответствующих отражённых волн R_s и R_p могут быть записаны следующим образом:

$$R_s = \left| \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \right|^2 = \left| \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i \right)^2}}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i \right)^2}} \right|^2 \quad (4)$$

$$R_p = \left| \frac{n_1 \cos \theta_t - n_2 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_t + n_2 \cos \theta_i} \right|^2 = \left| \frac{n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i \right)^2} - n_2 \cos \theta_i}{n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i \right)^2} + n_2 \cos \theta_i} \right|^2 \quad (5)$$

Для прошедшего излучения амплитуду можно найти следующим образом:

$$T_s = 1 - R_s \quad (6)$$

$$T_p = 1 - R_p \quad (7)$$

Формулы (4) – (7) называются формулами Френеля и позволяют определять амплитуды отражённой и прошедшей (преломлённой) волн на границе двух однородных изотропных сред с нулевой проводимостью [64].

Частным случаем является падение на границу раздела сред неполяризованного излучения (сумма волн с равными амплитудами s и p поляризаций). В этом случае амплитуды отражённой и прошедшей волн будут определяться следующим образом:

$$R = \frac{1}{2}(R_s + R_p); T = 1 - R \quad (8)$$

Другим частным случаем является ситуация нормального падения излучения ($\theta_i = \theta_r = \theta_t = 0$), в котором тригонометрические функции формул (4) и (5) упрощаются, и амплитуды отражённой и прошедшей волн не зависят от поляризации излучения:

$$R = \left| \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right|^2; T = 1 - R \quad (9)$$

Из этого можно сделать вывод, что в системе контроля, работающей в режиме нормального падения (или близкого к нормальному) контролирующего излучения на подложку, при измерении коэффициентов отражения и пропускания информацией о поляризации излучения можно пренебречь. Это, однако, не отменяет необходимость учитывать поляризацию при синтезе покрытия, поскольку создаваемые фильтры могут быть использованы под иными углами падения.

Известно [63], что для того чтобы узнать, как распространяется плоская монохроматическая волна через слоистую среду, последнюю достаточно

охарактеризовать 2×2 -матрицей, которая связывает компоненты электрического (или магнитного) векторов поля на плоскости границы раздела с этими компонентами на произвольной параллельной плоскости. Такую матрицу называют *характеристической матрицей* слоистой среды. Матричный подход к расчёту амплитудных коэффициентов пропускания и отражения системы, состоящей из любого количества однородных изотропных слоёв, сводится к произведению нескольких характеристических матриц, каждая из которых характеризует прохождение плоских монохроматических волн через соответствующие слои [63; 64]. Такой подход является удобным и значительно упрощает аналитический расчёт, а главное, при вычислении на современных компьютерах позволяет мгновенно решать прямую задачу многослойных покрытий для любого многослойного покрытия.

Применение формул Френеля и характеристических матриц слоистой среды возможно лишь для монохроматического излучения и не подходит для расчётов в широком спектральном диапазоне. Действительно, показатель преломления среды в общем случае зависит от длины волны ($n = n(\lambda)$) и лишь для фиксированной длины волны λ_0 может быть охарактеризован числом (в общем случае комплексным). Однако данные методы расчёта можно применять для решения прямой задачи в широком спектральном диапазоне, если построить сетку длин волн для анализируемого спектрального диапазона с требуемой дискретностью. Для узлов такой сетки известен показатель преломления сред из их дисперсионных характеристик. Опираясь на то, что длина волны излучения не меняется при прохождении слоистых сред, и, применяя матричный подход, можно для любой конфигурации слоёв построить коэффициенты пропускания и отражения в широком спектральном диапазоне – в каждом узле сетки длин волн.

Таким образом, решение прямой задачи многослойных покрытий в широком спектральном диапазоне – это нахождение коэффициентов пропускания и отражения подложки с многослойным покрытием под заданным углом падения излучения с заданной поляризацией для выбранной сетки длин волн. Решение

данной задачи всегда существует, оно единственно и может быть найдено как аналитически, так и численно. Даже для большой сетки длин волн численное решение прямой задачи на современном компьютерном оборудовании происходит почти мгновенно.

Обратная задача многослойных покрытий и их синтез

Обратная задача многослойных покрытий заключается в нахождении конфигурации покрытия (например, набора толщин слоёв), спектр пропускания и отражения которого соответствует требуемому с заданной точностью. В отличие от прямой задачи многослойных покрытий обратная не решается аналитически и требует численного решения вариативным путём. Процесс решения обратной задачи более требователен к вычислительным ресурсам, однако быстрый рост вычислительных возможностей современной компьютерной техники позволяют решать её всё быстрее и качественнее [93]. В отличие от прямой задачи, которая имеет единственное решение, при решении обратной для заданных спектральных требований на коэффициенты отражения и пропускания покрытия можно получить различные решения (конфигурации покрытия), либо же не получить решения вовсе. Алгоритмы решения обратной задачи многослойных покрытий основаны на минимизации функционала невязки, оценивающего отличие расчётного коэффициента пропускания или отражения от требуемого (желаемого) путём вариации параметров покрытия. Под требуемым решением понимается та конфигурация покрытия, для которой функционал невязки достаточно мал для того, чтобы удовлетворять требованиям спектральной задачи с учётом допустимых отклонений. Решение обратной задачи является основой синтеза многослойных покрытий.

Постановка задачи синтеза покрытий

В 1958 году Ф. Баумейстер впервые сформулировал задачу синтеза покрытий как задачу оптимизации [94]. Задача оптимизации определяется набором *параметров покрытия* и видом *целевой функции*, которую нужно

минимизировать. Если использовать модель многослойного покрытия с абсолютно однородными, изотропными и гладкими (без шершавости) слоями и зафиксировать показатели преломления подложки (n_0), среды (n_s), количество слоёв (N) и их материалы (n_i), то свободными (не зафиксированными) параметрами будут толщины слоёв (d_i). Можно ввести вектор параметров покрытия X как:

$$X = \{d_i\}_{i \in [0..N]} \quad (10)$$

В этом случае одним из примеров целевой функции $f(X)$ может быть следующее выражение:

$$f(X) = \left\{ \frac{1}{L} \sum_{j=1}^L \left[\frac{R_{\text{числ}}(X, \lambda_j) - R_{\text{треб}}(\lambda_j)}{\Delta R_j} \right]^2 \right\}^{1/2}, \quad (11)$$

где

- λ_j – сетка длин волн в рабочей спектральной области;
- L – количество точек сетки;
- $R_{\text{числ}}(X, \lambda_j)$ – численный коэффициент отражения оптимизируемого покрытия;
- $R_{\text{треб}}(\lambda_j)$ – требуемый коэффициент отражения;
- ΔR_j – весовые коэффициенты для уменьшения допусков в важных спектральных областях фильтра (используются при необходимости).

Тогда задача синтеза покрытия сводится к минимизации целевой функции путём варьирования свободных (не зафиксированных) параметров покрытия X . Данная задача аналогична поиску локальных минимумов целевой функции на многомерном пространстве размерностью $|X|$.

Д. Добровольский предложил классификацию методов проектирования покрытий по двум основным классам: методы локальной оптимизации покрытия и методы синтеза (методы нелокальной оптимизации) [95]. Локальная оптимизация в данном случае представляет собой перемещение в многомерном пространстве

параметров покрытия от какой-то начальной точки (значения вектора X) до одного из ближайших локальных минимумов целевой функции $f(X)$. Методы нелокальных оптимизаций подразумевают поиск локальных минимумов во всём пространстве. Ранее для решения задач проектирования изначально применялись только методы локальной оптимизации, однако в настоящее время применяются современные методы нелокальной оптимизации, которые используют методы локальной оптимизации как одну из составных частей всего процесса синтеза.

В 1982 году профессором А. В. Тихонравовым был предложен новый метод синтеза покрытий – метод «Игольчатой вариации» («Needle optimization») [46], который является методом нелокальной оптимизации. Метод начал активно применяться лишь в середине и конце 90-х годов [47; 48; 49], получив в дальнейшем огромное распространение в проектировании оптических покрытий, и в настоящее время является одним из наиболее эффективных инструментов для решения различных задач синтеза покрытий. В данном методе используется добавление тонких слоёв в текущую конфигурацию покрытия и варьирование их толщины [47]. В профиле показателя преломления покрытия данные слои похожи на иглы, что и определило название метода. Позднее появились различные модификации данного алгоритма, например [50].

Благодаря появлению методов синтеза покрытий, основанных на нелокальной оптимизации, стало возможным использовать вычислительные мощности компьютерной техники для автоматического решения обратной задачи и полуавтоматического синтеза покрытий – нахождения различных дизайнов покрытий, удовлетворяющих спектральным требованиям задачи. Тем не менее, полный цикл синтеза нетривиальных многослойных покрытий до сих пор является непростой и творческой задачей, в которой специалисту необходимо применять различные знания и опыт в этой области.

Таким образом, *задачей синтеза покрытий является задача нахождения конфигурации (дизайна) покрытия, при которой спектральные характеристики покрытия, такие как коэффициент пропускания, отражения или поглощения в*

выбранном спектральном диапазоне, соответствуют требуемым с заданными допусками. Одной из основных мер качества синтеза покрытия является величина целевой функции: чем она меньше, тем ближе спектральные характеристики фильтра к требуемым.

Программное обеспечение для синтеза покрытий и решения прямой и обратной задач

Концепция расчёта оптических фильтров существенно поменялась 60 лет назад, когда Баумейстер продемонстрировал возможность оптимизации оптических фильтров с применением компьютерной программы [94]. До этого момента большинство многослойных оптических фильтров состояло из четвертьволновых слоёв и рассчитывалось графическими методами. Впоследствии стремительно развивающиеся компьютерные технологии позволили разработать различные алгоритмы и методы синтеза покрытия [96]. В настоящее время вычислительные мощности персональных компьютеров позволяют производить решение прямой и обратной задач практически в реальном времени (менее секунды) для покрытий, состоящих из сотен слоёв. Для таких численных вычислений существуют различные программные продукты:

- OptiLayer;
- FilmStar;
- ThinFilmCenter;
- OpenFilters;
- и другие.

Обзор и сравнение возможностей наиболее известных из них можно найти в работе [97]. Несмотря на широкие возможности данных программных продуктов многие промышленные и исследовательские компании продолжают разрабатывать своё программное обеспечение для схожих целей [98]. Это связано с тем, что своё программное обеспечение может быть оперативно изменено и адаптировано под новые задачи и условия, в то время как коммерческие решения по своей природе менее гибкие. Среди данного списка лишь «OpenFilters» [98] является свободным

(Free/Libre and Open Source Software), остальные продукты являются проприетарными. К сожалению, функций, заложенных в ПО «OpenFilters» на момент разработки системы контроля, было недостаточно для применения её в составе автоматизированной системы контроля и для проведения исследований путём компьютерного моделирования. В частности, отсутствовала возможность решать обратную задачу многослойных покрытий в фоновом автоматизированном режиме (без участия пользователя) через библиотечное или другое межпроцессное взаимодействие, что являлось необходимым условием.

В случае проприетарных продуктов трудно достоверно судить о реализации заложенных в них алгоритмов, поскольку они могут относиться к «know-how» и составлять коммерческую тайну, однако предположительно данные пакеты программного обеспечения используют схожие, иногда идентичные алгоритмы расчёта многослойных покрытий, основанные на известных подходах решения прямой и обратной задач и методах синтеза покрытий. Один из передовых методов, который используется для синтеза покрытия является упомянутый ранее метод игольчатой вариации. Данный метод оказался настолько успешным, что он в том или другом виде представлен почти во всех известных продуктах как один из основных.

Среди представленного списка программных продуктов присутствует пакет «OptiLayer» [51], который позволяет решать численно как прямую, так и обратную задачу, используя различные физические модели многослойных покрытий, использовать несколько разных методов синтеза и многое другое. Данный программный продукт существует исключительно на английском языке и используется преимущественно в иностранных компаниях. Он разрабатывается в лаборатории ВЦ МГУ под руководством профессора Тихонравова, предложившего метод игольчатой вариации. Кроме метода игольчатой вариации данный пакет поддерживает метод нелокальной оптимизации «Gradual Evolution» [99; 100; 101], упрощение дизайна путём удаления наименее значимых слоёв [101] и пред-производственный анализ результатов [65; 102; 103; 104], который позволяет

оценить перспективность и целесообразность нанесения созданного покрытия при известном уровне погрешностей нанесения.

Преимуществом программного пакета «OptiLayer» является то, что во многих задачах он оказывается в десятки раз быстрее конкурентов, что важно для проведения расчётов в реальном времени. Кроме того, в пакет программ «OptiLayer» входит библиотека численного расчёта «OptiReOpt», с которой можно осуществлять взаимодействие в реальном времени во время нанесения покрытия без участия пользователя через динамическую загрузку (динамическую линковку).

Совокупность данных достоинств стала определяющей при выборе программного решения для численных решений прямой и обратной задач многослойных покрытий. В результате данный коммерческий программный продукт был выбран для интеграции в программное обеспечение разрабатываемой системы контроля и использования в исследовании метода широкополосного оптического контроля с помощью компьютерного моделирования.

2.3 Модель вакуумной установки и системы контроля

Основной характеристикой качества спектрального контроля является погрешность измерения толщин слоёв покрытия. Данная погрешность включает систематическую и случайную составляющие. Для нахождения оптимальных параметров системы контроля требовалось исследовать зависимости случайной и систематической погрешностей от различных характеристик системы контроля и других факторов для выбранного метода – непрямого широкополосного оптического контроля по спектрам отражения.

В качестве отправных характеристик модельной системы были взяты характеристики элементной базы, которую планировалось использовать для создания реальной системы контроля. Система контроля разрабатывалась для оснащения вакуумных установок типа «ВУ-2М» и их аналогов. В качестве характеристик спектрометра были взяты характеристики малогабаритного

спектрометра «Колибри-2» [73] на основе линейки фотодиодов БЛПП-369. Поэтому здесь и далее, если не оговорено отдельно, то использованы параметры этой линейки: количество фотоячеек – 2612, зарядовая ёмкость фотоячейки – 2 000 000 электронов, шум чтения – 150 электронов. Спектрометр «Колибри-2» благодаря повороту и замене дифракционной решётки может работать в любом спектральном диапазоне в пределах диапазона чувствительности детектора 190 – 1100 нм, однако во избежание наложения нерабочих порядков дифракционного спектра в качестве основного варианта был выбран рабочий спектральный диапазон 500 – 1000 нм [105]. В качестве характеристик модельного источника были взяты характеристики источника «Ocean Optics HL-2000-FHSA», на основе галогенной лампы. Спектральные характеристики данного источника были взяты из его паспортных данных [106], а также измерены на спектрометре.

На Рисунке 13 представлена оптическая схема моделируемой системы контроля, работающей методом непрямого широкополосного оптического контроля по спектрам отражения. Излучение из источника 1 вводится в вакуумную камеру 2, где расположены испарители материалов с различными показателями преломления 3а и 3б, и падает на поверхность контрольной подложки 4. Также в камере находятся рабочие подложки 5, и дополнительные контрольные подложки 6, недоступные для нанесения материала. Отражённое от контрольной подложки излучение попадает в спектрометр 7.

Контроль ведётся при угле падения излучения на подложку близком к нормальному – угол падения излучения на подложку относительно нормали для вакуумной установки типа «ВУ-2М» составил около $1,4^\circ$. Как следует из параграфа 2.2 и было проверено экспериментально, для такого угла падения влиянием поляризации излучения на коэффициенты отражения и пропускания покрытия, в большинстве случаев, можно пренебречь. В ходе моделирования и исследования результатов требовалось оценить оптимальность выбранных элементов системы и технических решений, а также предложить пути снижения погрешностей системы контроля.

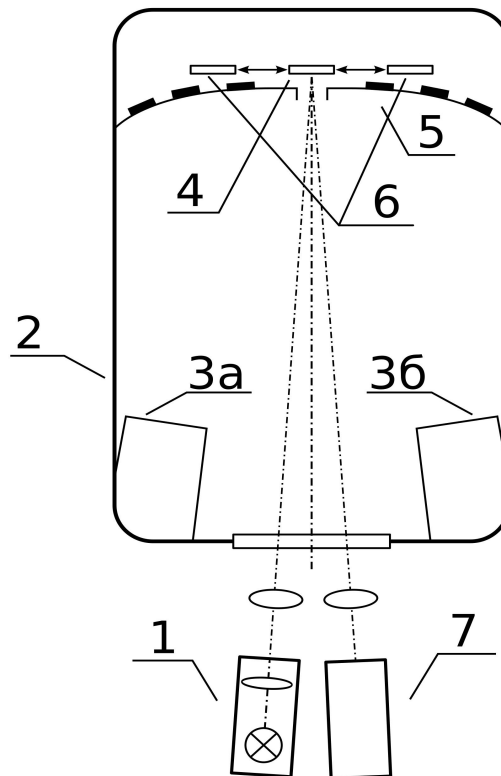


Рисунок 13 – Модельная схема системы контроля по коэффициенту отражения:
 1 – источник излучения, 2 – вакуумная камера, 3а и 3б – испарители материала,
 4 – контрольная подложка, 5 – рабочие подложки,
 6 – дополнительные контрольные подложки, 7 – спектрометр

Методика и средства моделирования

На основании экспериментальных и литературных знаний из данной области были выявлены основные факторы, влияющие на качество получаемых спектральных фильтров:

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

В соответствии с данной моделью разработано программное обеспечение «Deposition Control Simulator» [107], позволяющее проводить моделирование

измерения толщины слоя и оценивать влияние рассмотренных факторов на случайные и систематические погрешности измерения, как по отдельности, так и совместно. На Рисунке 14 представлена схема работы программы моделирования системы контроля, где зелёным цветом отмечены входные параметры, а синим – выходной.

1. На первом этапе моделирования используются параметры дизайна покрытия, состоящего из одного слоя на подложке: толщина слоя, показатели преломления $n(\lambda)$ материалов слоя и подложки. В отличие от показателя преломления подложки, значения которого в спектральном диапазоне контроля можно измерить с достаточной точностью, значения $n(\lambda)$ наносимого слоя часто являются заниженными или завышенными относительно ожидаемых из-за нестабильности технологического процесса нанесения покрытий на современных установках. Для моделирования этой неточности в показатель преломления материала слоя вносится систематическая погрешность Δn .
2. Далее путём решения прямой задачи рассчитывается спектр отражения данного многослойного покрытия.
3. В полученный спектр вносятся искажения, обусловленные несовершенством системы контроля: в соответствии с моделью шума добавляются шум чтения линейки фотодетекторов и дробовой (квантовый) шум, погрешность градуировки спектрометра по длинам волн и дрейф интенсивности источника излучения.
4. На последнем этапе проводится решение обратной задачи многослойных покрытий – нахождение толщины слоя по искажённому спектру отражения. Найденная таким образом толщина слоя отличается от заданной изначально на величину погрешности определения толщины слоя. Данная погрешность является выходной характеристикой моделирования.

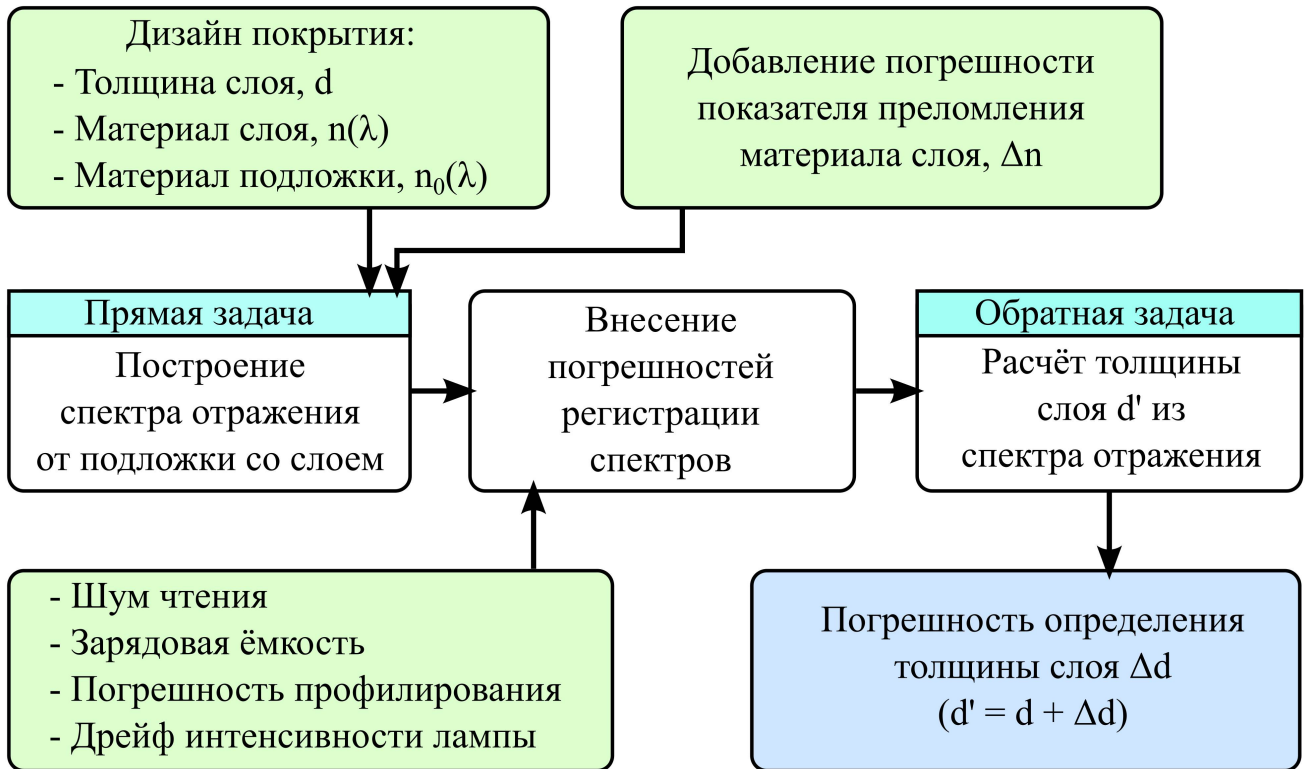


Рисунок 14 – Схема работы программы моделирования системы контроля

При фиксированных значениях входных параметров проводятся многократные циклы моделирования, отличающиеся случайными реализациями шума. В результате строятся зависимости погрешностей определения толщины слоя от его толщины, которые можно разделить в приближении закона нормального распределения на систематические и случайные. Под **систематической погрешностью** понимается отклонение среднего значения (математического ожидания) измеренной толщины слоя от реальной, а под **случайной погрешностью** – среднее квадратическое отклонение результатов измерений. Проводя повторные процессы моделирования, программа автоматически строит зависимости случайной и систематической погрешностей определения толщины слоя от выбранного параметра при фиксированных значениях остальных.

Для решения прямой и обратной задач многослойных покрытий ПО «Deposition Control Simulator» [107] использует библиотеку «OptiReOpt» так же,

как и разрабатываемая система контроля [108; 109], что позволяет исключить возможные различия в математических вычислениях.

В качестве материалов слоёв в моделировании использованы диэлектрики TiO_2 и SiO_2 , которые широко применяются при создании многослойных оптических покрытий и обладают относительно высоким и низким показателями преломления соответственно. В качестве контрольных подложек использованы оптические стекла Schott BK7 типа крон с показателем преломления $n \approx 1,52$ и Hikari LASF-01 типа флинт с $n \approx 1,8$. Дисперсионные характеристики показателя преломления $n(\lambda)$ материалов слоёв и подложек были взяты из базы данных ПО «OptiLayer».

Задаваемые параметры системы контроля

Шум линейки фотодетекторов

Согласно [110] шум выходного сигнала фотоячейки состоит из двух независимых источников случайного шума – шума чтения и дробового (квантового) шума, которые в разработанной модели можно задавать отдельно. Шум выходного сигнала фотоячейки вносит случайную погрешность в регистрируемые спектрометром спектры отражения – $I(\lambda)$. Спектр отражения этого слоя рассчитывают по формуле:

$$R(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} R_0(\lambda), \quad (12)$$

где $I_0(\lambda)$ – спектр отражённого от калибровочной подложки излучения (калибровочный спектр), а $R_0(\lambda)$ – спектр отражения калибровочной подложки. Случайной погрешностью $I_0(\lambda)$ и $R_0(\lambda)$ можно пренебречь, так как их значения получают путём усреднения большого количества измерений. Калибровочный спектр получают перед началом работы системы контроля, а в случае необходимости – перед нанесением очередного слоя.

Погрешность профилирования спектрометра, спектральный диапазон контроля и количество фотодетекторов в линейке спектрометра

Градуировка спектрометров с анализаторами МАЭС по длинам волн (профилирование) осуществляется путём сопоставления спектров линейчатых источников спектра (например, лампы полого катода) со спектральными линиями из базы данных в ручном или автоматическом режимах. Погрешность такой градуировки называется «погрешностью профилирования». Погрешность профилирования, равная 0,2 шага размещения фотоячеек в линейке, в реальных условиях является близкой к наименьшей из возможных и ограничена погрешностью измерения положения центра зарегистрированных линий [111].

Погрешность профилирования, выраженная в длинах волн – $\Delta\lambda$, зависит от количества фотодетекторов в линейке и от рабочего спектрального диапазона спектрометра. Так, увеличение количества фотодетекторов для фиксированного спектрального диапазона или уменьшение этого диапазона с сохранением количества фотодетекторов позволяет уменьшить эту погрешность, выраженную в длинах волн. Погрешность профилирования учитывалась в виде систематического сдвига спектра по длинам волн на $\Delta\lambda$. Модельная интенсивность спектра с учётом погрешности профилирования $I'(\lambda) = I(\lambda + \Delta\lambda)$, где $I(\lambda)$ – истинная интенсивность спектра, а $\Delta\lambda$ – погрешность профилирования в единицах длин волн.

Было проведено моделирование непрямого оптического контроля толщины слоя для различных спектральных диапазонов и количества фотодетекторов в линейке. Однако, поскольку оказалось, что эти характеристики влияют на результирующие погрешности преимущественно через изменение погрешности профилирования, выраженной в единицах длин волн, то достаточно будет рассмотреть результат с изменением рабочего спектрального диапазона. Интерес к изучению влияния погрешности профилирования через изменение спектрального диапазона был вызван тем, что такое изменение в современных спектрометрах, как правило, легко осуществляется путём замены дифракционной решётки.

Дрейф интенсивности источника излучения

Источник излучения «Ocean Optics HL-2000-FHSA» с галогенной лампой имеет дрейф интенсивности не более 0,3 % в час [106]. Нанесение одного слоя занимает около 20-30 минут, а процесс нанесения всего многослойного покрытия может длиться 8 часов и более. Таким образом, если калибровка системы контроля по калибровочной подложке проводится перед нанесением каждого слоя, то изменение интенсивности в спектре, вызванное дрейфом интенсивности лампы, должно быть не более 0,2 %, а если калибровка проводится однократно перед нанесением всего многослойного покрытия, – может достигать 2 %. Модельная интенсивность спектра с учётом дрейфа $I'(\lambda) = I(\lambda) (1 + \Delta I/100)$, где $I(\lambda)$ – истинная интенсивность спектра, а ΔI – дрейф интенсивности в процентах.

Систематическая погрешность показателя преломления материала слоя

Для простоты систематическая погрешность в показателе преломления учитывалась в виде $n'(\lambda) = n(\lambda) (1 + \Delta n/100)$, где $n(\lambda)$ – изначальная зависимость показателя преломления от длины волны, а Δn – сдвиг показателя преломления в процентах.

Программное обеспечение «Deposition Control Simulator»

Рабочее окно разработанной программы для моделирования представлено на Рисунке 15. Справа в окне программы представлены параметры, влияющие на погрешность измерения толщины слоя, которые можно изменять. Слева вверху показаны спектры отражения до и после внесения искажений (красным и чёрным соответственно), а внизу – графики зависимостей погрешности определения толщины слоя от заданного параметра, как правило, толщины слоя.

Программное обеспечение позволяет в полностью автоматизированном режиме проводить огромное количество циклов моделирования, делая в каждой точке получаемых графиков сотни решений обратной задачи [107] для формирования большой выборки, достаточной для достоверного разделения систематической и случайной погрешностей. При исследовании зависимости

строились, как правило, с сеткой в 1000 точек по толщине слоя (оси абсцисс). Большое количество циклов моделирования и высокая детализация по толщине слоя приводили к тому, что построение одной зависимости для одного материала происходило за 8 - 12 часов на современном персональном компьютере.

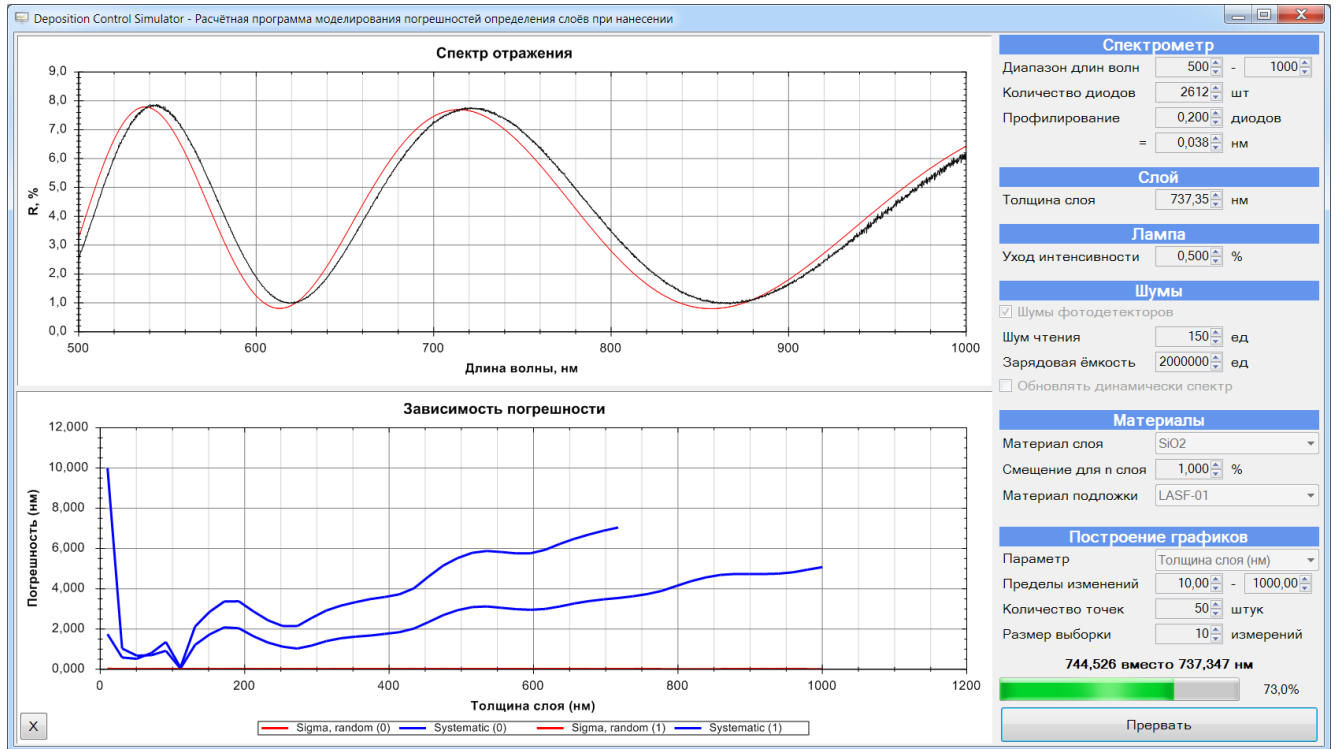


Рисунок 15 – Рабочее окно программного обеспечения «Deposition Control Simulator»

2.4 Результаты моделирования и их обсуждение

Погрешности определения толщины слоя без внесения источников погрешностей были рассчитаны для рабочего спектрального диапазона 500 – 1000 нм. В результате для слоёв толщиной 1 – 10000 нм общая погрешность измерения толщины слоя составила менее 10^{-3} нм для материалов SiO_2 и TiO_2 . На Рисунке 16 красным цветом приведена зависимость случайной погрешности (σ) измерения толщины слоя SiO_2 от его толщины. Такой уровень погрешности является недостижимо малым для существующих вакуумных установок и систем контроля, что говорит о возможности нахождения индивидуальных вкладов

отдельных источников погрешности без какого-либо дополнительного вклада от самих циклов моделирования при использовании данного подхода с решением прямой и обратной задач.

Влияние шума линейки фотодетекторов

В соответствии с моделью шума выходного сигнала фотоячейки [110] были построены зашумлённые модельные спектры отражения в спектральном диапазоне 500 – 1000 нм. Добавление шума привело к появлению случайной погрешности измерения толщины слоя σ и не привело к возникновению систематической погрешности. На Рисунке 16 показаны зависимости σ от толщины слоя (1 – 5000 нм) при учёте шума линейки фотодетекторов для материалов SiO_2 и TiO_2 . Видно, что σ результатов измерения толщины слоя для обоих материалов практически не меняется при увеличении толщины слоя. Это позволяет сделать вывод, что в случае непрямого оптического контроля можно использовать большие значения толщины слоя на контрольной подложке без существенного увеличения случайной погрешности, связанной с шумом линейки фотодетекторов. Кроме того, видно, что для тонких слоёв (менее 30 нм) наблюдается существенный рост погрешности, который связан с отсутствием экстремумов и точек перегиба в регистрируемых спектрах, что негативно влияет на точность решения обратной задачи. Данная проблема подробно рассмотрена в главе 3.

Также из зависимостей на Рисунке 16 следует, что для слоя SiO_2 , нанесённого на стекло типа крон ВК7, погрешность измерения его толщины существенно больше, чем для TiO_2 в аналогичных условиях. Этот эффект можно объяснить близостью показателей преломления материала слоя SiO_2 и подложки, что существенно снижает интенсивность отражённого излучения на границе раздела подложка-слой. Кроме того, для слоя SiO_2 коэффициент отражения в рабочем спектральном диапазоне может быть менее 4 % (тогда как для слоёв TiO_2 он может достигать 30-35 %), что приводит к низкой интенсивности в спектре отражённого излучения и увеличению относительного уровня шума.

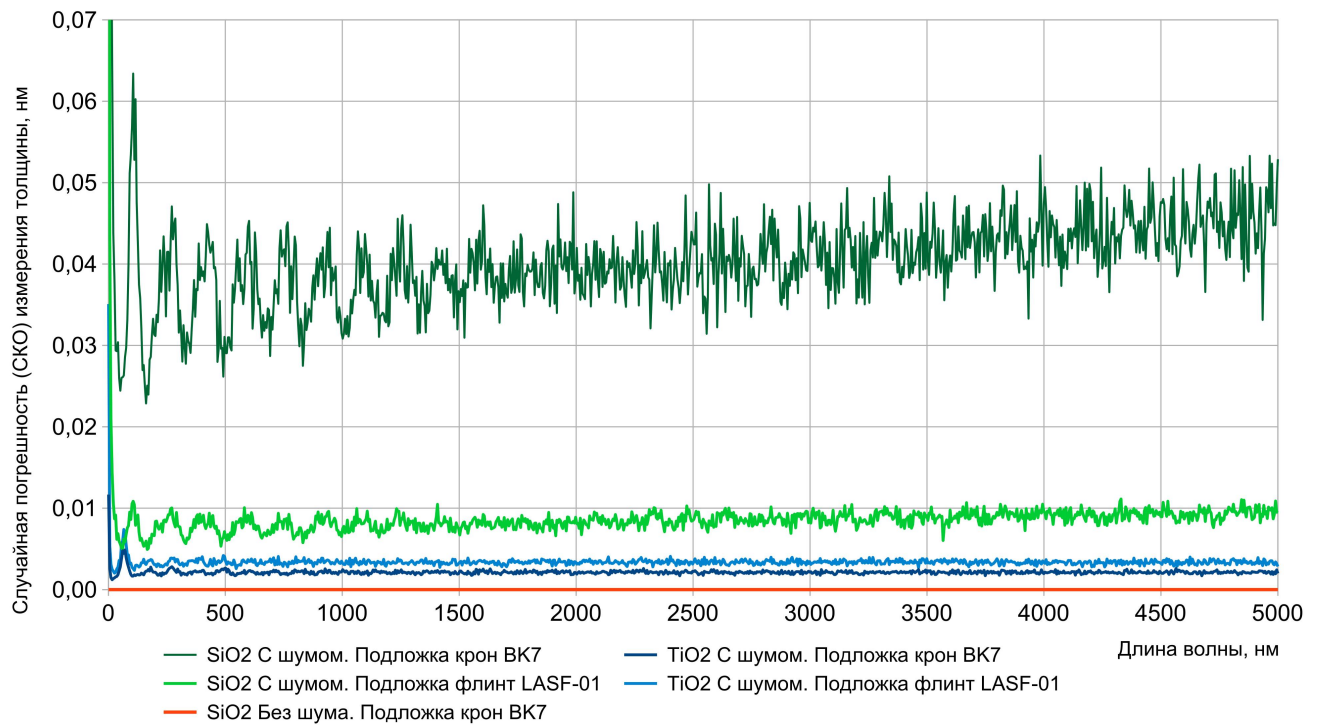


Рисунок 16 – Зависимость случайной погрешности σ измерения толщины слоя от его толщины

Для уменьшения погрешности измерения толщины слоя SiO₂, вносимой шумом линейки фотодетекторов, была использована подложка со сравнительно высоким показателем преломления флинт LASF-01 ($n \approx 1.8$, оптическое стекло Hikari). На Рисунке 16 показано (светло-зелёный график), что применение такой подложки привело к уменьшению случайной погрешности для слоя SiO₂ примерно в 4 раза.

Отсюда следует, что для контроля толщины слоя следует использовать контрольные подложки с показателем преломления существенно отличающимся от показателя преломления наносимого материала. В этом случае случайная погрешность измерения толщины слоя из материалов TiO₂ и SiO₂, обусловленная шумом линейки фотодетекторов, не будет превышать 0,015 нм для слоёв с толщинами более 30 нм. Близкое значение случайной погрешности на уровне 0,02 нм было получено экспериментально [108]. Такая низкая случайная погрешность измерения толщины слоя, по-видимому, получается благодаря большому количеству отчётов в зарегистрированных спектрах.

Влияние погрешности профилирования

Исследование влияния погрешности профилирования проводилось для спектральных диапазонов 500 – 1000 нм, 500 – 750 нм и 500 – 600 нм с учётом шума линейки фотодетекторов для материалов TiO_2 (на подложке BK7) и SiO_2 (на подложке LASF-01). Погрешность профилирования спектрометра выбиралась равной 0,2 от шага размещения фотоячеек. При этом погрешность профилирования, выраженная в длинах волн, для выбранных спектральных диапазонов составила 0,038; 0,019 и 0,0076 нм соответственно.

На Рисунке 17 представлены полученные зависимости систематической погрешности измерения толщины слоя от его толщины для разных спектральных диапазонов и материалов слоёв. При построении каждой точки графика использована выборка из 100 циклов моделирования со случайными реализациями шума линейки фотодетекторов. Полученные случайные погрешности измерения толщины слоя приведены на рисунке в виде доверительных интервалов 3σ .

Видно, что погрешность измерения толщины слоя, обусловленная погрешностью профилирования, имеет преимущественно *систематическую* природу. Особенно это заметно для слоя из материала TiO_2 , где случайная погрешность пренебрежимо мала. Видно также, что систематическая погрешность растёт почти линейно в зависимости от толщины слоя. Рост погрешности при увеличении толщины слоя объясняется увеличением количества осцилляций в зарегистрированных спектрах отражения, при котором смещение по длинам волн, вызванное неточным профилированием, начинает играть бóльшую роль.

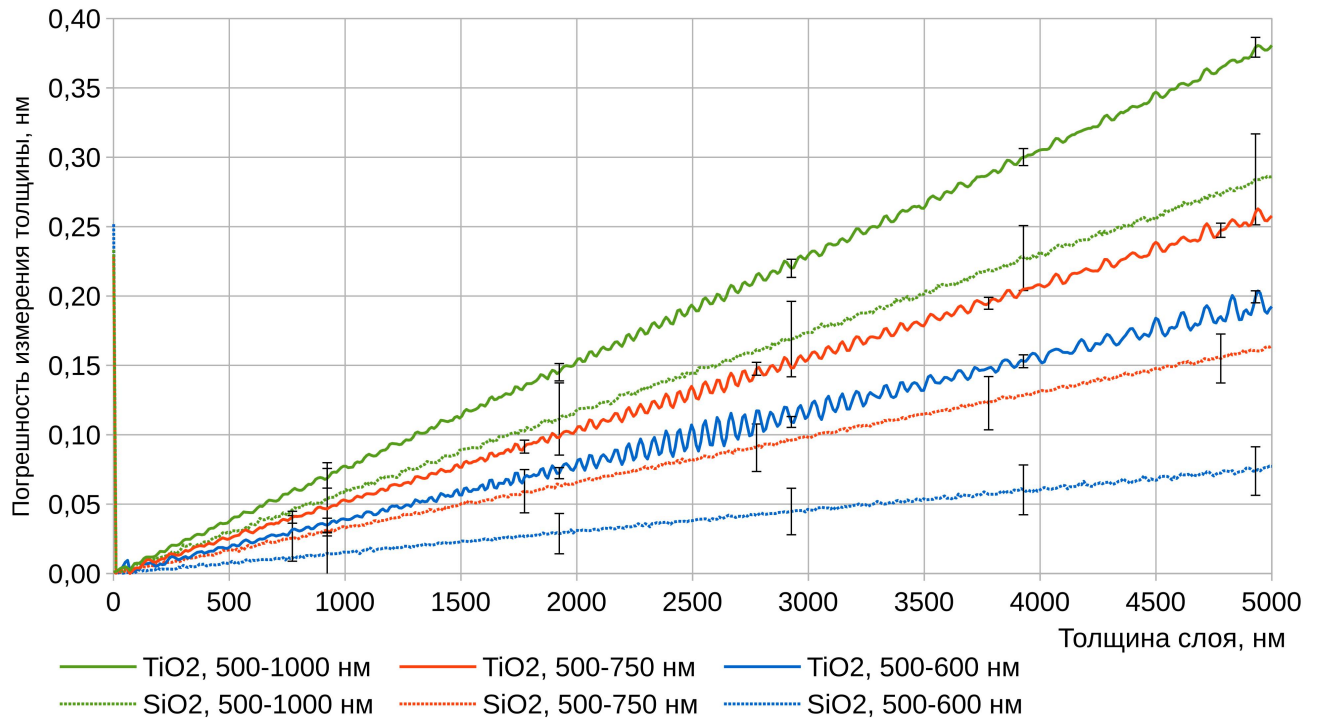


Рисунок 17 – Зависимость систематической погрешности от толщины слоя для разных спектральных диапазонов контроля (случайные погрешности приведены в виде доверительных интервалов 3σ)

Из графиков можно сделать вывод, что при непрямом оптическом контроле следует периодически менять контрольную подложку на новую по достижению определённой толщины слоя, которая зависит от требуемой погрешности, например, при 2500 – 3000 нм для получения погрешности менее 0,2 нм.

В ходе исследования также было обнаружено, что для материалов с высоким и низким показателями преломления предпочтительно иметь меньшую погрешность профилирования, выраженную в нм, нежели более широкий спектральный диапазон контроля. Следовательно, для разрабатываемой установки можно предложить уменьшить рабочий спектральный диапазон для уменьшения шага фотодетекторов в спектрах и соответствующего уменьшения погрешности профилирования. Это должно привести к снижению систематической погрешности измерения толщин слоёв, обусловленной погрешностью профилирования.

Влияние дрейфа интенсивности источника излучения

Результаты моделирования различных уровней дрейфа интенсивности источника излучения для слоя SiO_2 на подложке LASF-01 представлены на Рисунке 18. Для слоя TiO_2 на подложке BK7 зависимость имеет аналогичный вид, но погрешности, из-за большей разницы показателей преломления материала и подложки, в 1,5-2 раза меньше.

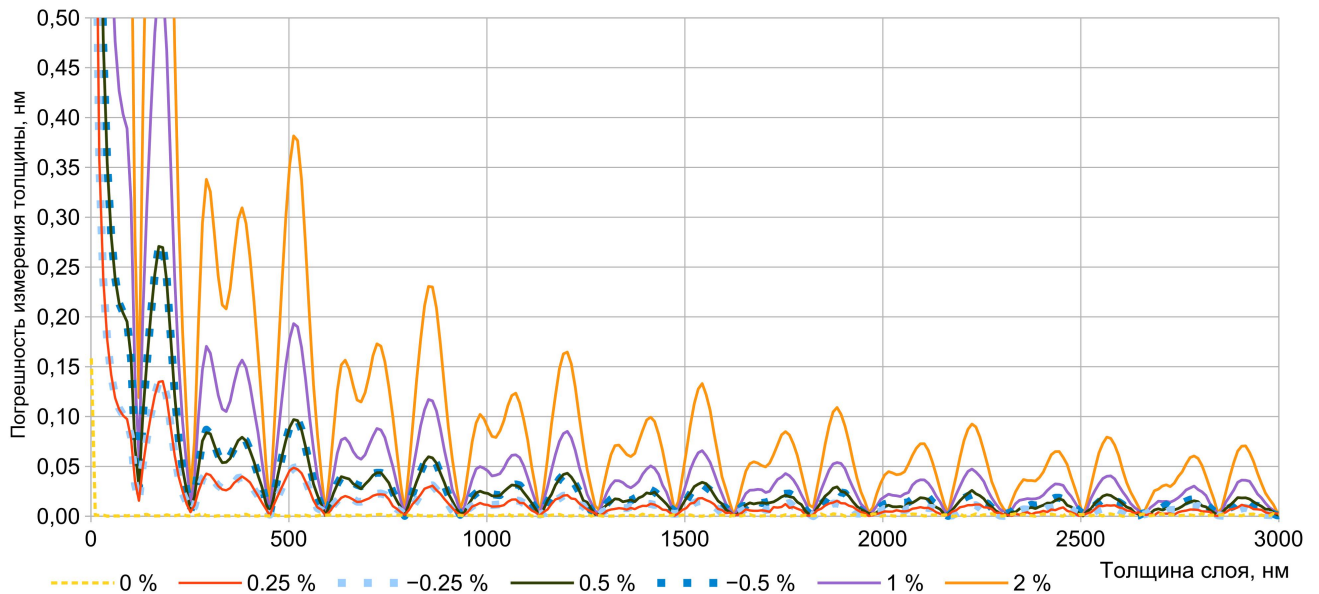


Рисунок 18 – Зависимость систематической погрешности измерения толщины слоя SiO_2 от его толщины при разном уровне дрейфа интенсивности спектра ΔI

Погрешность, вызванная дрейфом интенсивности, является систематической и увеличивается с уменьшением толщины слоя. Было получено, что погрешности определения толщины, вызванные дрейфом интенсивности спектра равные по модулю, но различные по направлению дрейфа (по знаку ΔI), практически совпадают (Рисунок 18). Можно сделать вывод, что погрешность измерения толщины слоя определяется модулем значения дрейфа интенсивности источника излучения. Кроме того, обнаружено, что для достаточно тонкого слоя (менее 30 нм) погрешность, вызванная дрейфом интенсивности спектра, является соизмеримой с толщиной всего слоя, что неприемлемо. Проблема нанесения таких слоёв рассмотрена в главе 3.

Для разрабатываемой установки можно предложить проведение периодической калибровки системы контроля по калибровочной подложке, что должно привести к снижению систематической погрешности измерения толщин слоёв, обусловленной дрейфом интенсивности источника. Калибровка системы с источником «Ocean Optics HL-2000-FHSA» перед нанесением каждого слоя позволит снизить дрейф интенсивности спектра до 0,15 – 0,2 %.

Влияние погрешности показателя преломления материала слоя

В рассмотренных модельных экспериментах в качестве толщины нанесённого слоя использовалась его физическая толщина, которая является характеристикой слоя, не зависящей от длины волны проходящего излучения. Однако, поскольку в многослойных покрытиях излучение проходит путь, определяемый не физическим расстоянием, а оптическим, и во все оптические выражения физическая толщина входит в виде произведения с показателем преломления, то можно сказать, что все спектральные характеристики фильтра определяются оптической толщиной, которая зависит от длины волны проходящего излучения.

Если бы в качестве анализируемой погрешности, вызванной погрешностью показателя преломления материала слоя, использовалась погрешность измерения физической толщины, то она росла бы с увеличением толщины слоя почти линейно. Однако при реальном нанесении и спектральном контроле погрешность в значении показателя преломления материала слоя $n(\lambda)$ приводит к появлению соответствующей компенсирующей погрешности в физической толщине слоя d , и оптическая толщина слоя $d \cdot n(\lambda)$ оказывается близка к расчётной. Основная причина, по которой не происходит полной компенсации, заключается в том, что показатель преломления зависит от длины волны, и одновременная компенсация погрешностей для всех длин волн анализируемого диапазона невозможна. Таким образом, для корректного исследования влияния погрешности показателя преломления материала слоя на итоговую погрешность измерения толщины слоя анализировалась *погрешность измерения оптической толщины слоя*.

Были проведены модельные эксперименты с различными значениями систематической погрешности в значении показателя преломления. На Рисунке 19 показаны зависимости систематической погрешности измерения оптической толщины слоя материалов TiO_2 (на подложке BK7) и SiO_2 (на подложке LASF-01) для различных значений Δn . Видно, что случайные погрешности, которые показаны на рисунке в виде доверительных интервалов 3σ , пренебрежимо малы в сравнении со систематическими, что согласуется с результатами работы [90], которая посвящена исследованию влияния систематических погрешностей на точность измерения и контроля.

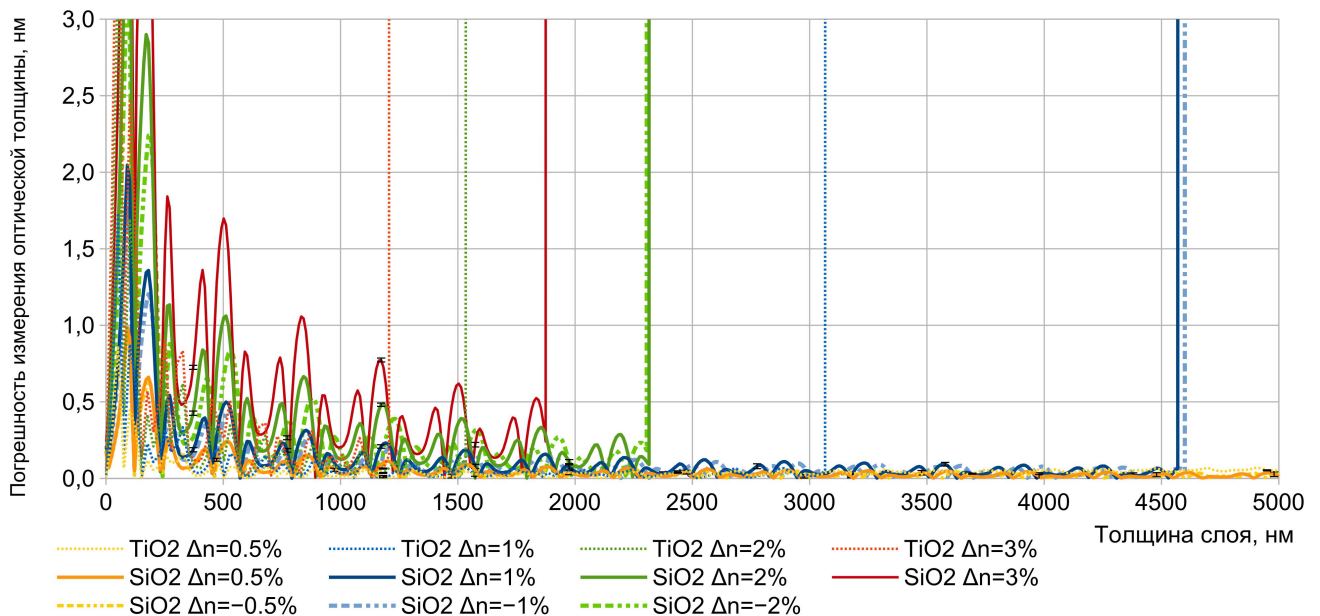


Рисунок 19 – Зависимость систематической погрешности измерения оптической толщины слоя от его толщины при разных погрешностях показателя преломления Δn (случайные погрешности приведены в виде доверительных интервалов 3σ)

При увеличении толщины слоя происходило увеличение количества осцилляций в анализируемых спектрах отражения, которые из-за своей дискретности существенно деформировались вплоть до того, что алгоритмы, использованные для решения обратной задачи, выдавали неприемлемые результаты (погрешности в сотни нанометров). В этом случае считалось, что контроль с такой погрешностью Δn для данной толщины слоя невозможен. Так, из

Рисунка 19 видно, что для контроля нанесения слоёв с толщинами до 1500 нм необходимо было иметь погрешность показателя преломления менее 2 %, поскольку иначе используемые алгоритмы не позволяли найти толщину с адекватной погрешностью. Также из графиков на Рисунке 19 следует, что знак погрешности показателя преломления практически не влияет на итоговые погрешности измерения и максимальную толщину слоя, при которой возможен контроль данными алгоритмами.

В случае непрямого оптического контроля, как правило, регистрируют спектр отражения покрытия, состоящего из одного слоя, который может иметь достаточно большую толщину. В этом случае влияние погрешности показателя преломления становится особенно важным, в связи с чем, кажется перспективным уточнение показателя преломления материала в ходе нанесения по регистрируемым спектрам в реальном времени. Поскольку погрешность показателя преломления играет такую большую роль и может препятствовать нахождению толщины, то такое уточнение, позволит существенно уменьшить погрешность измерения оптической толщины слоя.

Суммарное влияние рассмотренных источников погрешностей

Возможность исследования источников погрешностей независимо друг от друга является важным достоинством предложенного подхода, однако при использовании реальной вакуумной установки и системы контроля источники погрешностей будут влиять на измерения одновременно. Потому было проведено исследование их совместного влияния на погрешности измерения оптической толщины слоя с параметрами создаваемой системы для вакуумной установки «ВУ-2М». Использованные параметры установки для моделирования: спектральный диапазон контроля 500 – 1000 нм, количество фотодетекторов в линейке 2612, погрешность профилирования 0,2 от шага размещения фотоячеек, смещение интенсивности источника излучения 0,2 % (паспортный дрейф менее 0,3 % в час [106]), зарядовая ёмкость фотоячейки 2 000 000 электронов, шум чтения 150 электронов. Моделирование проводилось для погрешности показателя

преломления материала слоя 0 % и 0,5 %. Для материала TiO_2 использовалась подложка крон ВК7, а для SiO_2 – флинт LASF-01. Погрешность измерения была рассчитана для физических толщин слоя 1 – 5000 нм с шагом 10 нм. Для построения каждой точки графика использована выборка из 100 циклов моделирования. Полученные зависимости систематической погрешности измерения от толщины слоя представлены на Рисунке 20. Случайные погрешности приведены в виде доверительных интервалов 3σ .

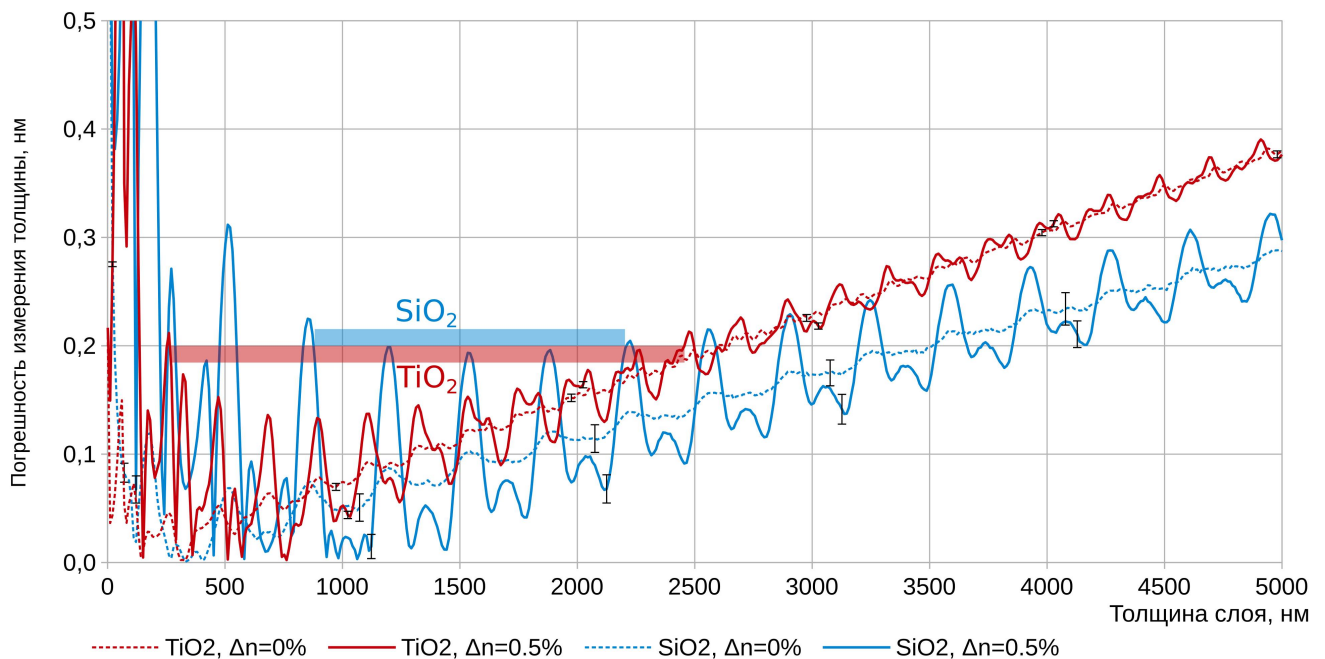


Рисунок 20 – Зависимость систематических погрешностей измерения толщины слоя от толщины слоя для материалов TiO_2 и SiO_2 (случайные погрешности приведены в виде доверительных интервалов 3σ)

Анализируя результат на Рисунке 20 и полученные ранее результаты для индивидуального влияния источников погрешностей, можно сделать вывод, что при толщинах слоёв менее 1000 – 1500 нм наибольший вклад в погрешность измерения вносят дрейф интенсивности источника излучения (Рисунок 18) и погрешности показателя преломления (Рисунок 19), а при больших толщинах слоёв — погрешность градуировки спектрометра по длинам волн (Рисунок 17).

Кроме того, из Рисунка 20 видно, что при погрешности задания показателя преломления материалов менее 0,5 % возможно получение погрешности измерения физической толщины, не превышающей 0,2 нм в случае окончания нанесения контролируемого слоя при его толщине:

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

Эти диапазоны определяют оптимальные толщины слоёв для обоих материалов на выбранных подложках, при которых можно получить минимальные погрешности измерения толщины слоя для выбранных характеристик элементов системы контроля и параметров нанесения.

Выводы к главе 2

Предложена компьютерная модель системы контроля, которая учитывает основные факторы, влияющие на точность измерения толщин 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 показателей преломления наносимых материалов.

В соответствии с данной моделью разработано программное обеспечение «Deposition Control Simulator» [107], позволяющее проводить моделирование измерения толщины слоя и оценивать влияние рассмотренных факторов на случайные и систематические погрешности измерения как по отдельности, так и совместно. С помощью данного ПО получены зависимости погрешностей определения толщины слоя от его толщины, которые разделены в приближении закона нормального распределения на систематические и случайные [112].

В рамках исследования проведена обработка результатов и сформулированы следующие 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 (Рисунки 17 и 20), приводит к необходимости замены контрольной подложки по достижению определённой толщины слоя материала, например, для создаваемой системы контроля – 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.

Моделирование с использованием параметров создаваемой системы контроля при погрешности показателя преломления материалов не более 0,5 % показало возможность получения погрешности измерения физической толщины слоя менее 0,2 нм для материала TiO_2 на подложке ВК7 при толщине

контролируемого слоя 300 – 2400 нм, и для материала SiO₂ на подложке LASF-01 при толщине 800 – 2200 нм.

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 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.

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 [19; 81; 113; 114], паразитные подпыления, немгновенность остановки нанесения материала и другие, которые неизбежно увеличивают погрешности контроля и нанесения. Тем не менее, исследование предоставляет оценку снизу для ожидаемых погрешностей при выбранных средствах регистрации спектров и решения обратной задачи и даёт ценные указания и рекомендации для проектирования системы контроля, работающей с помощью метода непрямого оптического широкополосного контроля.

3 РАЗРАБОТКА МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИН ТОНКИХ СТАРТОВЫХ СЛОЁВ

Настоящая глава посвящена разработке метода измерения толщин тонких стартовых слоёв (первых на контрольной подложке) 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. Интерес представляли в первую очередь источники погрешностей, которые вносят существенную погрешность для слоёв малой толщины, а именно: изменение интенсивности источника (ΔI), вызванное дрейфом интенсивности лампы, и погрешность показателя преломления материала слоя (Δn), вызванная неточностью его задания. Дополнительно было решено оценить влияние знака этих погрешностей – направления дрейфа интенсивности источника и систематического смещения показателя преломления.

На основании результатов исследования был предложен метод контроля тонких стартовых слоёв, который заключается в том, что измерение 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 нанесённых слоёв выбирается на основе результатов компьютерного моделирования в разработанном программном обеспечении с целью получения оптимальной для контроля толщины слоя на момент окончания его нанесения.

3.1 Анализ погрешностей измерения толщин тонких стартовых слоёв

Влияние погрешности профилирования спектрометра, как показано в предыдущей главе, приводит к необходимости замены контрольной подложки по достижению определённой толщины слоя материала, например, на модельной установке – при 2000 – 3000 нм. Такая толщина слоя является относительно большой для оптических фильтров, поскольку при создании многослойных покрытий, как правило, не требуются слои с толщинами, многократно превышающими четверть длин волн рабочего диапазона покрытия. В связи с этим, для оптических покрытий замена подложки требуется приблизительно 1 раз на 10 – 30 слоёв материала. Для случая двух материалов это соответствует 20 – 60 слоям итогового покрытия, что достаточно для большинства оптических покрытий. В случае, если суммарные толщины всех слоёв одного материала покрытия меньше 2000 нм, то замена контрольных подложек для этого материала вообще не требуется. Кроме того, сама замена контрольной подложки при достижении толщиной слоя верхней границы диапазона оптимальных толщин осуществляется без каких-либо технических трудностей, например, путём поворота барабана с подложками. Иначе обстоит дело в случае недостаточности толщины контролируемого слоя для попадания её в оптимальный диапазон толщин покрытия, например, при контроле стартовых тонких слоёв.

Для того чтобы исследовать погрешности нанесения таких слоёв было проведено дополнительное исследование погрешностей нанесения для физических толщин слоя 0 – 500 нм с шагом 1 нм, в каждой точке было проведено 100 циклов моделирования. Для исследования были взяты значения погрешностей и условия нанесения, аналогичные условиям из предыдущей главы: спектральный диапазон контроля 500 – 1000 нм, количество фотодетекторов в линейке 2612, погрешность профилирования 0,2 от шага размещения фотоячеек, смещение интенсивности источника излучения 0,2 %, зарядовая ёмкость фотоячейки

2 000 000 электронов, шум чтения 150 электронов. Смещение показателя преломления было равно 0,5 %, что, на практике, является достаточно малым, но достижимым значением. Для материала TiO_2 использовалась подложка крон ВК7, а для SiO_2 – флинт LASF-01.

Для такого исследования главный интерес представляют источники погрешностей, которые приводят к существенной погрешности для слоёв с малой толщиной, а именно: смещение интенсивности источника, вызванное дрейфом интенсивности лампы (Рисунок 18), и погрешность показателя преломления материала слоя, вызванная неточностью его задания (Рисунок 19). Дополнительно было решено проверить выводы о важности знаков этих погрешностей (направления дрейфа интенсивности и систематического смещения показателя преломления) для этого диапазона толщин. В результате компьютерного моделирования были получены зависимости погрешности измерения толщины слоя от его толщины для комбинаций материалов, смещений интенсивностей источника и погрешностей показателя преломления, перечисленных в Таблице 1.

Полученные зависимости систематической погрешности измерения от толщины слоя представлены на Рисунке 21, случайные погрешности приведены в виде доверительных интервалов 3σ . Синим и зелёным цветами представлены зависимости для материала TiO_2 , а оттенками красного представлены результаты для SiO_2 . Из данного результата можно сделать следующие выводы:

- погрешности определения толщин таких слоёв можно считать преимущественно систематическими, поскольку доверительные интервалы 3σ малы, а графики систематической погрешности с их учётом не совпадают;
- знаки ΔI и Δn , соответствующие направлению дрейфа интенсивности источника излучения и направлению смещения показателя преломления материала, при малых толщинах слоя имеют значение, но приводят к получению качественно схожих зависимостей. Так, на Рисунке 21 графики зависимостей для разных знаков ΔI и Δn сгруппированы по материалу.

Таблица 1 – Комбинации материалов, смещений интенсивностей источника и погрешностей показателя преломления для моделирования

№	Материал и подложка	Смещение интенсивности источника ΔI	Погрешность показателя преломления Δn
1	TiO ₂ на подложке BK7	0,2 %	0,5 %
2		– 0,2 %	0,5 %
3		0,2 %	– 0,5 %
4		– 0,2 %	– 0,5 %
5	SiO ₂ на подложке LASF-01	0,2 %	0,5 %
6		– 0,2 %	0,5 %
7		0,2 %	– 0,5 %
8		– 0,2 %	– 0,5 %

Также, из Рисунка 21 видно, что существенное (в 2-3 раза) уменьшение погрешности измерения толщины слоя для материала TiO₂ происходит при толщинах слоя более **140 нм**, а для SiO₂ – более **230 нм**. Кроме того, для тонких нанометровых слоёв (менее 10 нм) наблюдается существенный рост систематической погрешности при приближении толщины слоя к нулю. Для материала TiO₂ этот эффект менее заметен, но для SiO₂ значение погрешностей в толщинах нанометровых слоёв в разы больше, чем в других диапазонах (на Рисунке 21 эти значения погрешностей даже пришлось обрезать).

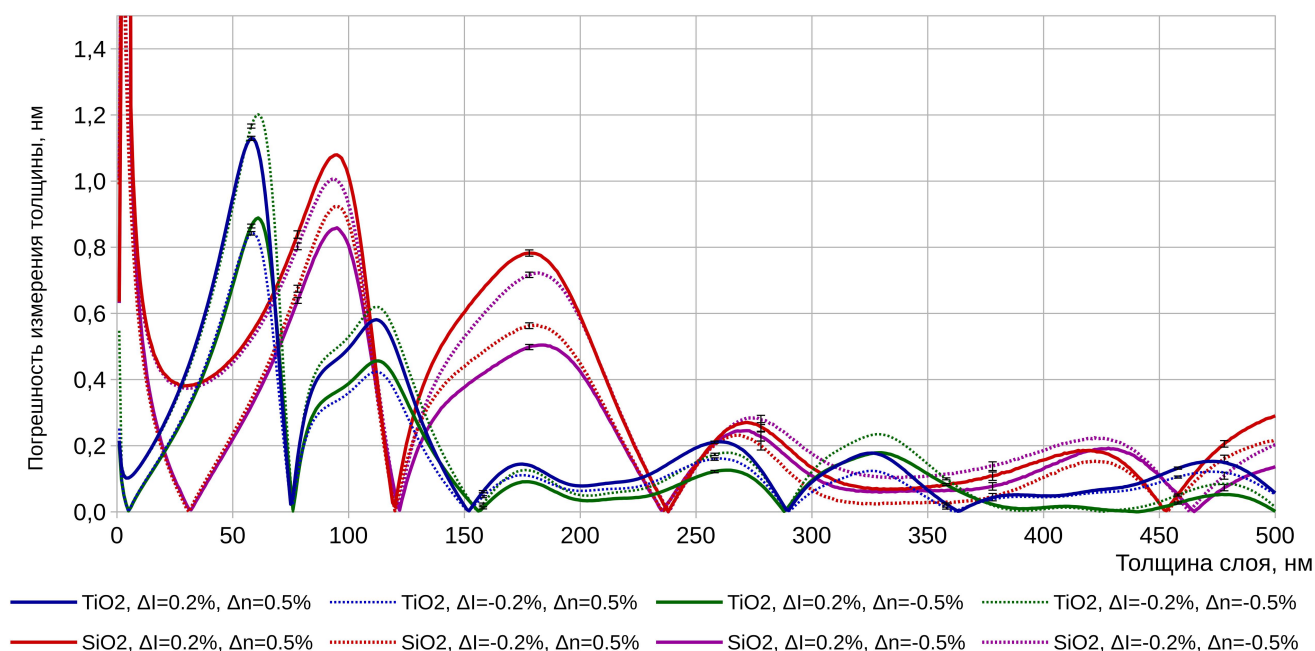


Рисунок 21 – Зависимость систематических погрешностей измерения толщины слоя от толщины слоя для комбинаций из Таблицы 1 (случайные погрешности приведены в виде доверительных интервалов 3σ)

На Рисунке 22 представлен увеличенный участок Рисунка 21 с зависимостями для слоёв SiO₂ с толщинами менее 50 нм. Можно отметить, что зависимости для разных значений Δl и Δn разделились на два характерных участка. Так, до толщины 7 нм полностью совпадают зависимости с одинаковыми Δl , а после 11 нм полностью совпадают зависимости с Δl и Δn противоположных знаков. Это интересное наблюдение говорит о том, что при толщинах слоя менее ~ 7 нм определяющим источником погрешности является погрешность задания показателя преломления Δn , причём погрешность для таких слоёв может быть неприемлемо большой. Так, для толщины слоя менее 6 нм спектральный контроль с расчётом через математическую библиотеку для двух комбинаций оказался вообще невозможен, поскольку погрешность определения толщин слоя оказалась почти равна его толщине: на Рисунке 22 виден линейный рост графика из нуля до соответствующей толщины 5 нм. Таким образом, можно утверждать, что проблема с измерением толщины тонких стартовых слоёв существует, и она особенно остро стоит для нанометровых слоёв.

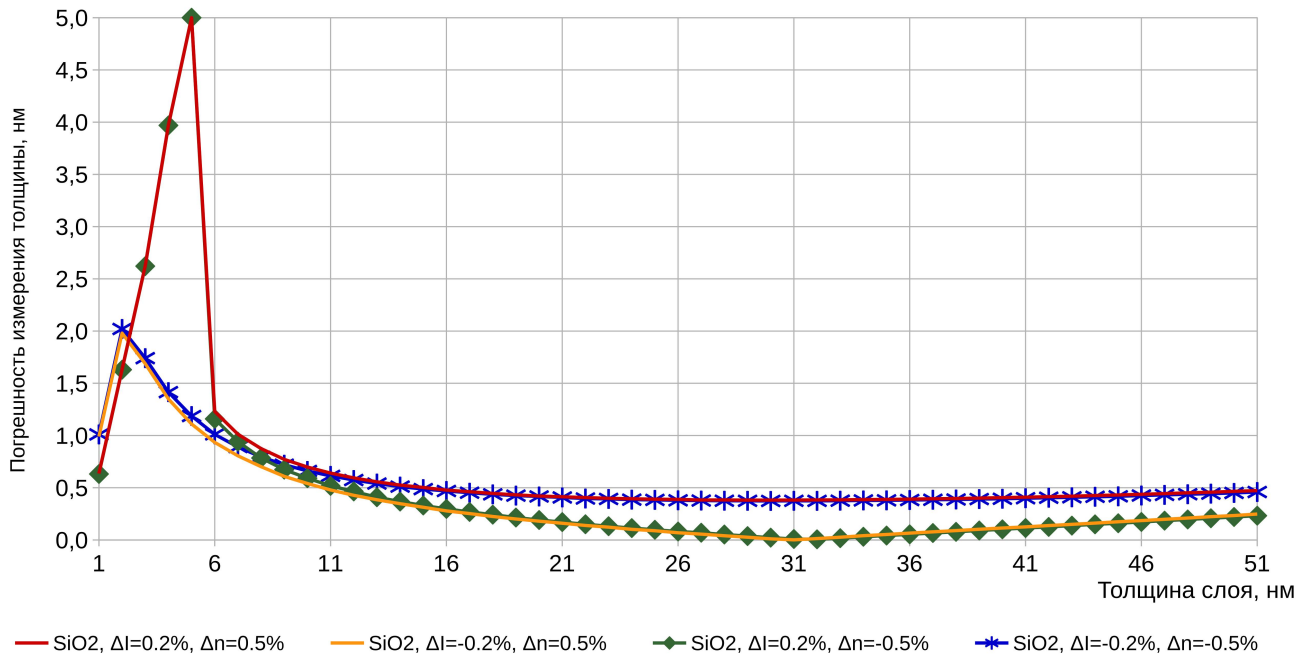


Рисунок 22 – Зависимость погрешностей измерения толщины слоя от толщины слоя для тонких слоёв материала SiO₂

3.2 Предпосылки для снижения погрешностей определения толщин

Попробуем определить возможную причину высокого уровня погрешности измерения толщины тонких слоёв. Для этого рассмотрим коэффициенты отражения для одного слоя SiO₂ на подложке LASF-01 с различными толщинами: 50, 55 и 60 нм без каких-либо источников погрешности (Рисунок 23).

Визуально полученные коэффициенты в спектральном диапазоне 500 – 1000 нм различны, однако отличие заключается в первую очередь в смещении по оси ординат, а какие-либо иные ориентиры (экстремумы, перегибы) в графиках отсутствуют. Наличие как минимум одного экстремума в измеряемых коэффициентах отражения или пропускания зачастую является необходимым требованием для корректной работы некоторых из алгоритмов контроля [89].

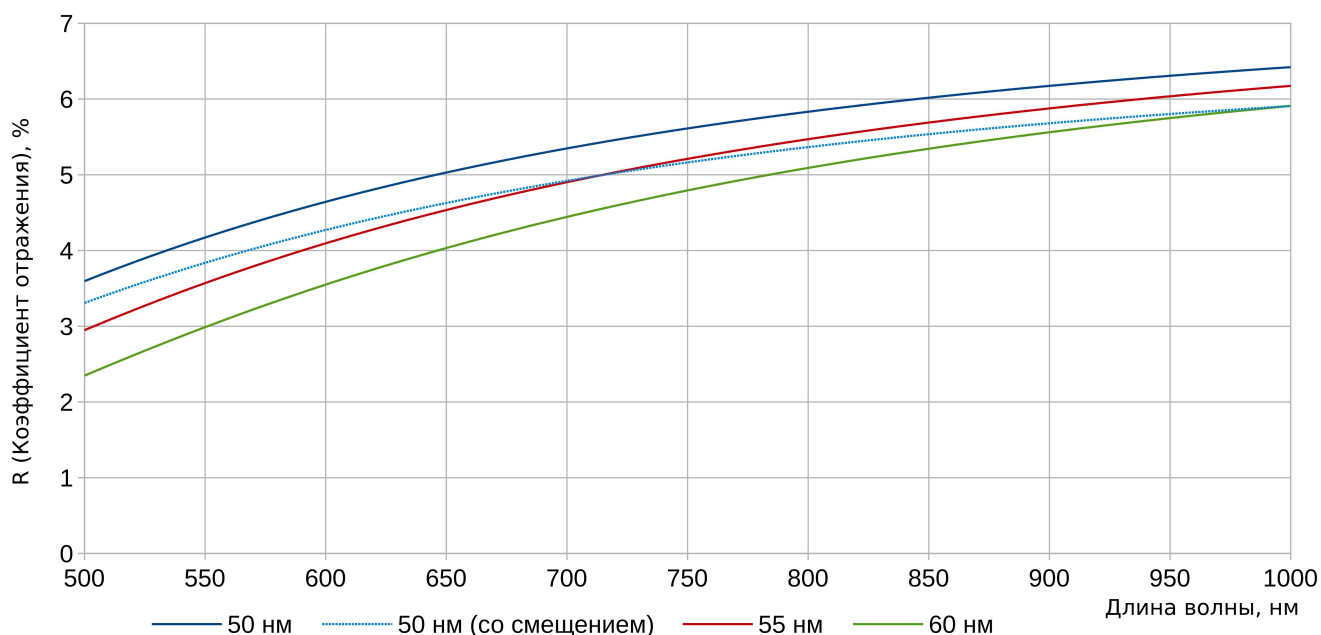


Рисунок 23 – Коэффициенты отражения слоя SiO_2 разной толщины (50, 55 и 60 нм физической толщины и 55 нм с множителем 0,92)

В современных программных пакетах для решения обратной задачи (поиска толщины слоя), как правило, используется минимизируемая целевая функция, основанная на сравнении зависимостей методом наименьших квадратов (МНК), как например, в формуле (11). Библиотека «OptiReOpt» из пакета «OptiLayer» в данном случае не является исключением. Такой выбор целевой функции и отсутствие экстремумов в спектрах, могут приводить к неприемлемо высоким погрешностям при контроле. Для демонстрации этого на Рисунке 23 показан коэффициент отражения слоя толщиной 50 нм со смещением интенсивности на 8 % ($R'(\lambda) = 0.92 R(\lambda)$), который можно получить на реальной вакуумной установке из-за продолжительного дрейфа интенсивности источника или существенной погрешности задания показателей преломления материалов. В этом случае алгоритмы, использующие для сравнения графиков МНК, будут находить по смещённому коэффициенту отражения неправильную толщину слоя около 55 нм, вместо реальных 50 нм. В связи с этим, кажется разумным использовать какую-либо иную целевую функцию для оценки меры невязки, например, основанную на корреляции зависимостей или взятия производной, однако

программное обеспечение «OptiLayer» и «OptiReOpt» ограничено методом оценки через сумму квадратов отклонений.

Теперь рассмотрим такую же ситуацию в случае измерения нанометровых слоёв, где эта проблема выражена ещё сильнее. На Рисунке 24 представлены коэффициенты отражения слоёв толщинами 5, 8 и 10 нм. Измерение сигнала от нуля на вакуумной установке является неизбежным. В этом случае отличия графиков в регистрируемом спектральном диапазоне ещё меньше и заключаются в небольшом изменении угла и смещении по оси ординат. В результате, из-за наличия дрейфа интенсивности источника излучения и погрешности задания показателя преломления материала, а также шумов линейки фотодетекторов, измерение толщины слоя с адекватной погрешностью становится затруднительным или невозможным.

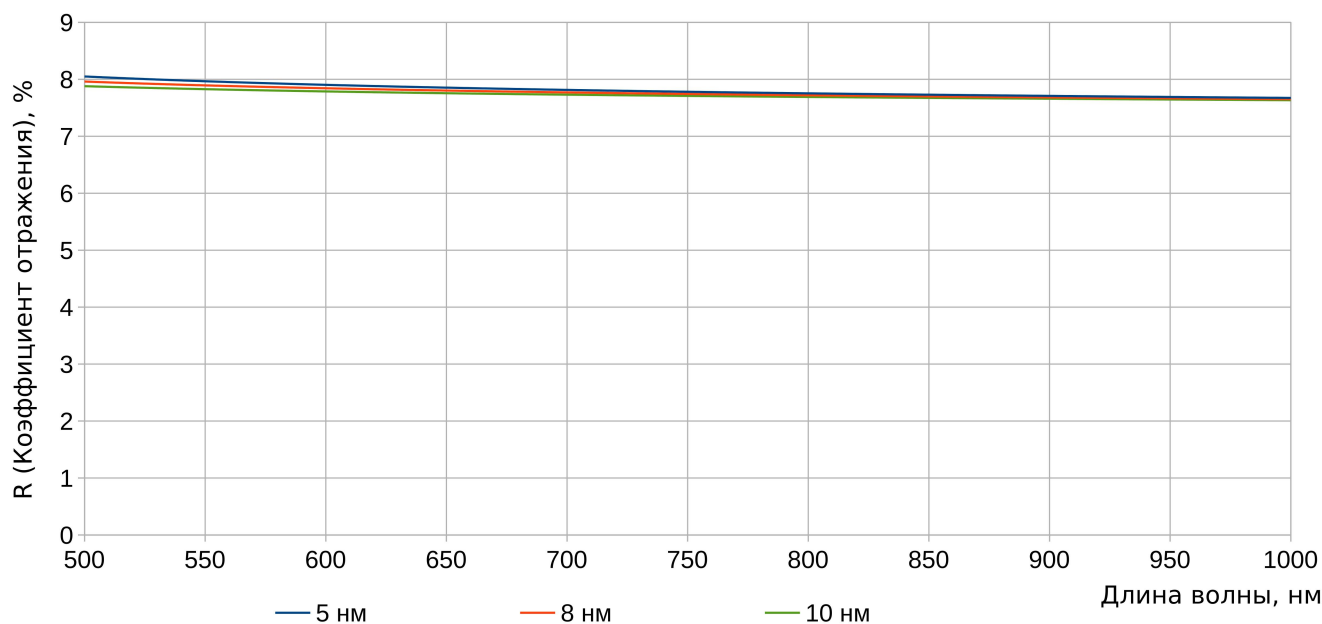


Рисунок 24 – Коэффициенты отражения слоя SiO₂ разной толщины (5, 8 и 10 нм физической толщины)

Аналогично рассмотрим на Рисунке 25 коэффициенты отражения слоёв с толщинами (1005, 1008, 1010 нм) и (1050, 1055, 1060 нм), которые имеют такое же отличие в количестве нанесённого материала, как и рассмотренные ранее слои (5, 8, 10 нм) и (50, 55 60 нм) соответственно. Во всех случаях в спектральной области

контроля присутствуют несколько экстремумов и точек перегиба, а отличия между графиками видны как изменение положения экстремумов и точек перегиба по длине волны (оси абсцисс). Это наблюдение является предпосылкой для снижения погрешности измерения толщин тонких стартовых слоёв. Действительно, на Рисунке 20 представлены результаты измерения для слоёв с такими толщинами, и видно, что погрешность измерения этих толщин может быть менее 0,2 нм даже при алгоритмах, использующих МНК для целевой функции.

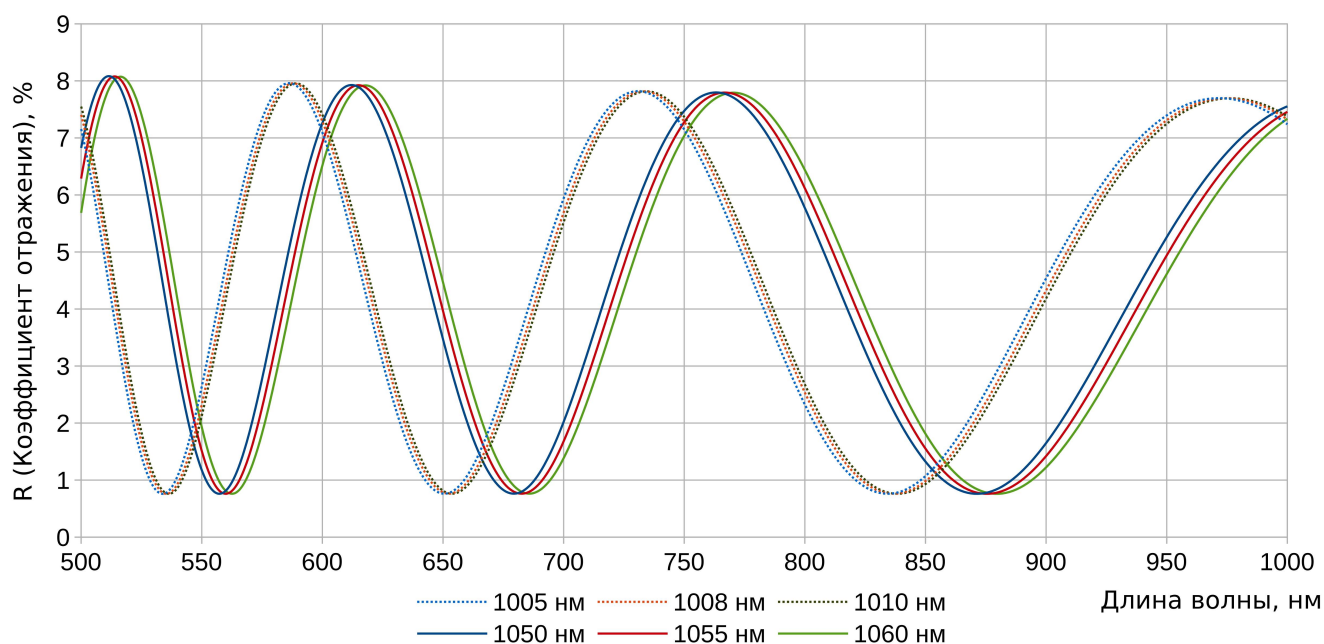


Рисунок 25 – Коэффициенты отражения слоя SiO₂ разной толщины (1005, 1008, 1010, 1050, 1055 и 1060 нм физической толщины)

Стоит отметить, что на положение экстремумов по длине волны практически не влияет смещение интенсивности, вызванное дрейфом интенсивности источника излучения или высокой погрешностью показателя преломления материала, однако важным фактором становится погрешность профилирования, поскольку она напрямую приводит к смещению спектров по длине волны.

3.3 Метод непрямого контроля с предварительно нанесённым слоем

В ходе синтеза покрытия часто получают конфигурации покрытия, где требуется, чтобы толщина первого слоя была значительно меньше длин волн контролируемых диапазонов, а удаление такого слоя несколько ухудшает целевую функцию. Нанесение стартовых слоёв толщиной 5 – 10 нм является решаемой задачей на существующих вакуумных установках, но спектральный контроль таких слоёв на системе контроля является затруднительным из-за высоких погрешностей, которые могут достигать толщины самого слоя. Данную проблему можно решить, отбрасывая конфигурации покрытия с такими стартовыми слоями на этапе синтеза покрытия или накладывая математическое ограничение на минимальную толщину первого слоя. Однако такое решение проблемы кажется неоптимальным, поскольку оно ограничивает синтез покрытия из-за технических, а не фундаментальных причин. Кроме того, как было показано в модельных экспериментах (Рисунок 21), *уровень погрешности измерения стартовых слоёв даже для «обычных» толщин, характерных для оптического фильтра на основе многослойных покрытий, выше в 4 – 5 раз, чем для других слоёв.* Для снижения погрешности оптического контроля нанесения стартовых слоёв с толщинами менее 140 нм для материала TiO_2 и 230 нм для материала SiO_2 , и, в особенности, для нанометровых слоёв (с толщинами менее 10 нм) предлагается использовать метод контроля с предварительно нанесённым слоем [115].

Данный метод контроля заключается в том, что контроль проводится непрямым оптическим методом контроля, а на контрольную подложку до начала контроля наносится слой материала достаточной толщины, чтобы в спектрах отражения или пропускания подложки со слоем появились экстремумы и точки перегиба. Выбор толщины предварительно нанесённого слоя следует осуществлять на основании результатов компьютерного моделирования системы контроля (например, как в главе 2), для того, чтобы суммарная толщина

предварительного нанесённого и стартового слоёв была в диапазоне оптимальных толщин, при которых достигаются наименьшие погрешности измерения для выбранного материала. На Рисунке 26 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 регистрируемых спектрах отражения или пропускания от длины волны присутствуют экстремумы и точки перегиба (см. Рисунок 25 и 4 на Рисунке 26), и определение толщины наносимого слоя происходит с погрешностями аналогичными остальным не стартовым слоям. Нанесение стартового слоя происходит одновременно на контрольную и на рабочие подложки, которые содержат итоговое покрытие, но поскольку на рабочих подложках предварительно нанесённый слой отсутствует, то конфигурация слоёв на них соответствует расчётному дизайну покрытия (см. рабочую подложку на Рисунке 26б).

Как следует из Рисунка 20, для выбранных характеристик элементов системы контроля и условий нанесения наименьшие погрешности измерения толщины для материала TiO_2 на подложке BK7 следует ожидать при толщине контролируемого слоя в диапазоне 300 – 2400 нм, а для материала SiO_2 на подложке LASF-01 при толщине контролируемого слоя в диапазоне 800 – 2200 нм. В случае использования других материалов или подложек, погрешности нанесения также без труда можно исследовать в программном обеспечении «Deposition Control Simulator» [107]. Для этого нужно внести в расчёт дисперсионные характеристики подложки и материала, построить соответствующие зависимости (аналогичные тем, что представлены на Рисунке 20) и найти оптимальный диапазон толщин. Из оптимального диапазона толщин слоя для проведения контроля легко найти оптимальную толщину предварительно нанесённого слоя. Кроме того, вместо подбора для материала контрольной подложки с существенно отличающимся показателем преломления

можно использовать любую подложку с предварительно нанесённым слоем из материала с существенно отличающимся показателем преломления и учесть это в расчётах.

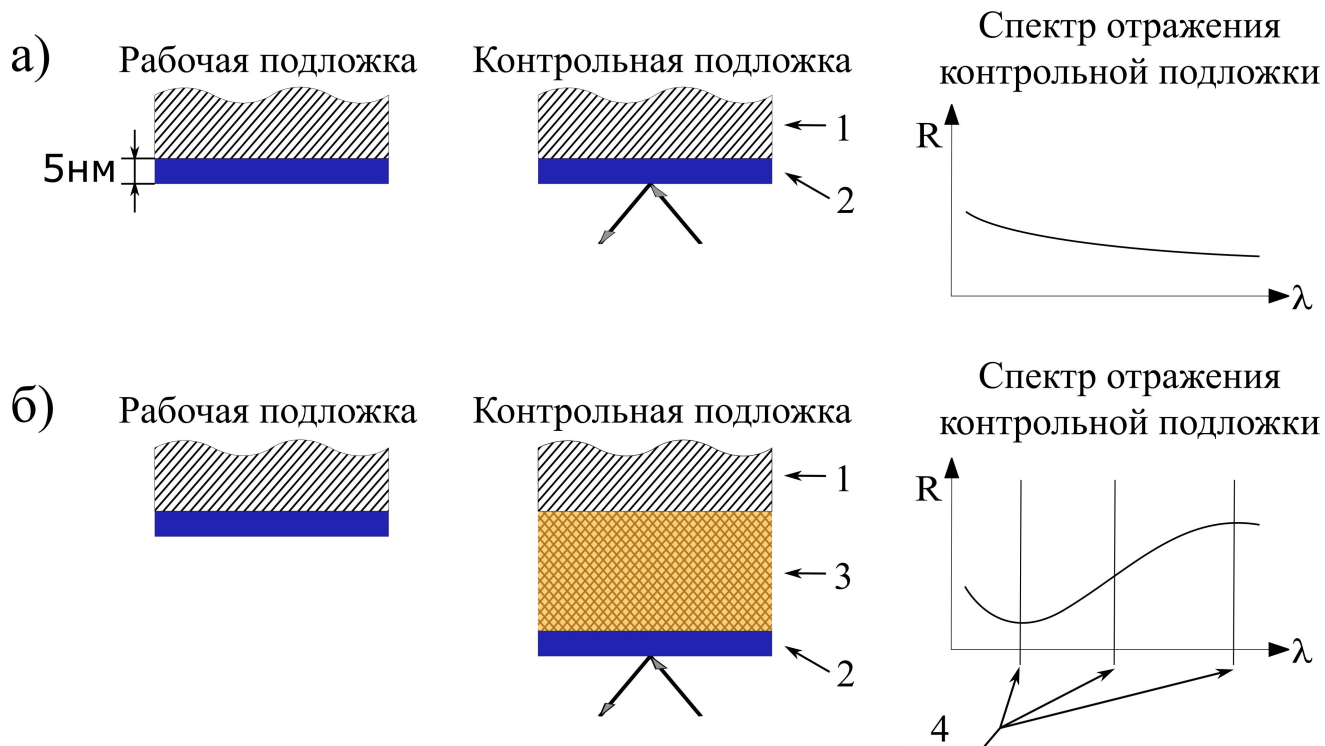


Рисунок 26 – Применение метода непрямого широкополосного контроля с предварительно нанесённым слоем для контроля нанесения слоя 5 нм, где 1 – контрольная подложка, 2 – слой толщиной 5 нм, 3 – предварительно нанесённый слой, 4 – экстремумы и точки перегиба в спектре

В Таблице 2 представлены систематические и случайные погрешности нанесения стартовых слоёв с применением предлагаемого метода и без него, полученные с помощью компьютерного моделирования. Видно, что для всех толщин слоёв произошло уменьшение систематической погрешности измерения в 2 – 5 и более раз для обоих исследованных материалов. В случае материала SiO_2 не прямой контроль стартового слоя толщиной 5 нм через математическую библиотеку «OptiReOpt» оказался почти невозможен, однако применение предварительно нанесённого слоя позволяет контролировать такой слой с систематической погрешностью менее 0,03 нм.

Таблица 2 – Сравнение систематической и случайной погрешностей измерения толщины стартовых слоёв в случае применения метода контроля с предварительно нанесённым слоем

Материал слоя и подложка	Физическая толщина слоя, [нм]	Погрешность измерения физ. толщины, [нм]			
		Метод непрямого контроля		Метод непрямого контроля с предварит. 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

3.4 Выводы к главе 3

Для контроля стартовых слоёв, которые являются первыми на контрольной подложке и имеют достаточно малую толщину (единицы и десятки нанометров), рекомендуется использовать метод контроля с предварительно нанесённым слоем. Выбор толщины предварительно нанесённого слоя следует осуществлять на основании результатов компьютерного моделирования системы контроля, для того, чтобы суммарная толщина предварительного нанесённого и стартового слоёв была в диапазоне оптимальных толщин, при которых достигаются наименьшие погрешности измерения для выбранного материала слоя, подложки, характеристик системы контроля и погрешности показателя преломления.

Применение данного метода контроля позволяет многократно снизить случайную погрешность, вызванную шумом линейки фотодетекторов, и систематические погрешности, вызванные дрейфом интенсивности источника излучения и погрешностью показателя преломления материала слоя. Для рассмотренных материалов (TiO_2 на подложке BK7 и SiO_2 на подложке LASF-01) применение данного метода привело к уменьшению погрешности измерения толщины слоя в 2-5 и более раз для всех рассмотренных толщин слоёв (5, 10, 50 и 100 нм).

Исследование показывает, что применение данного метода также оправдано в случае обычных стартовых слоёв оптических фильтров, поскольку в этом случае погрешность измерения снижается в 2-3 раза для слоёв с физическими толщинами менее 140 нм из материала TiO_2 , и менее 230 нм для слоёв из материала SiO_2 .

4 СОЗДАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ ШИРОКОПОЛОСНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ

Настоящая глава посвящена разработке и экспериментальному апробированию физико-технического решения системы контроля многослойных оптических покрытий, основанной на измерении спектров отражения в диапазоне 525 – 990 нм с последующим вычислением толщины слоя. Система поддерживает два метода контроля – прямой контроль и непрямой с использованием дополнительных контрольных подложек. В главе приведена оптическая схема системы контроля в составе вакуумной установки «ВУ-2М» и указаны основные характеристики использованных элементов системы. Рассмотрен механизм калибровки измеряемого сигнала разработанной системы по калибровочной подложке, характеристики которой предварительно измеряются с высокой точностью на стационарном спектрофотометре. Изложена информация о возможностях разработанного программного обеспечения для управления системой контроля.

Рассмотрена технология создания многослойного диэлектрического покрытия с применением метода непрямого контроля в широком спектральном диапазоне с автоматическим разбиением дизайна покрытия на дополнительные контрольные подложки. Дана информация о возможности измерения скорости нанесения материалов и приведён пример обнаружения паразитного подпыления из-за негерметичного закрытия напылительной заслонки.

Представлены результаты сравнения разработанной системы с существующими решениями крупных мировых производителей вакуумных установок и систем оптического контроля по ряду параметров, особенно важных при использовании непрямого широкополосного контроля. Продемонстрированы результаты применения системы контроля на примере некоторых спектральных фильтров, полученных на модернизированной вакуумной установке, оснащённой разработанной системой контроля.

4.1 Разработка системы спектрального широкополосного контроля

Несмотря на то, что существуют примеры успешных не-вакуумных процессов нанесения [116; 117], в подавляющем большинстве случаев создание многослойных диэлектрических покрытий осуществляют в вакуумной или газонаполненной камере путём многократного последовательного напыления слоёв из двух или более материалов с различными показателями преломления [118]. В настоящее время применяются различные способы нанесения материалов: термическое, электронно-лучевое и ионное испарения, катодное, магнетронное и высокочастотное распыления и другие [3; 4; 5; 6; 7]. Для повышения адгезии плёнок к подложкам и улучшения механических и оптических характеристик самих плёнок могут применяться вспомогательные технологии. Так, в случае электронно-лучевого испарения (ЭЛИ) для увеличения плотности и однородности слоёв, а также уменьшения напряжённостей в осаждаемой плёнке, может применяться бомбардировка подложки высокоэнергетическими частицами в ходе напыления [81; 113]. Если частицы создают с помощью ионной пушки, то такой процесс называют ионным ассистированием [19; 114]. Именно такой способ нанесения материала использовался на выбранной для модернизации вакуумной установке — нанесение материала с помощью электронно-лучевого испарения с ионным ассистированием.

Для получения требуемого спектра отражения или пропускания покрытия часто необходимо наносить десятки слоёв с характерными толщинами от единиц нанометров до нескольких микрометров с погрешностями порядка единиц нанометров физической толщины слоя 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 системы контроля определять толщину слоя и момент остановки его нанесения [8; 9].

В главе 1 были рассмотрены оптические и неоптические методы контроля, проведены сравнения и выявлены достоинства и недостатки этих методов. На основании изложенной информации и классификации методов контроля (Рисунок 10) был выбран метод, который представляется наиболее универсальным и перспективным – **метод непрямого широкополосного контроля по спектрам отражения с использованием численного решения обратных задач.**

При этом методе контроля на итоговую погрешность измерения толщины слоя влияют различные факторы и характеристики использованных оптических элементов системы, такие как: количество фотодетекторов в линейке спектрометра, дрейф интенсивности источника, погрешность калибровки интенсивности и градуировки спектрометра по длинам волн и другие. Из выводов главы 2, посвящённой компьютерному моделированию, следует, что при соблюдении всех рекомендаций по нанесению и контролю, для выбранных оптических элементов системы (малогабаритного спектрометра «Колибри-2» [73] на основе линейки фотодиодов БЛПП-369 и источника излучения «Ocean Optics HL-2000-FHSA» [106] на основе галогенной лампы) можно достичь суб-нанометрового уровня погрешностей измерения толщин слоёв. Рассмотрим данные элементы системы контроля более подробно.

Многоканальный спектрометр «Колибри-2»

Главным аппаратным элементом предлагаемой системы широкополосного контроля по спектрам отражения является спектрометр. Именно он определяет уровень шумов линейки фотодетекторов, спектральный диапазон контроля, количество фотодетекторов и их динамический диапазон, а также другие характеристики регистрируемых спектров.

В качестве детектора в разрабатываемой системе контроля использовался малогабаритный спектрометр «Колибри-2», внешний вид которого представлен на Рисунке 27. Данный спектрометр создан по схеме Черни-Тёрнера на основе плоской дифракционной решётки и анализатора МАЭС с одной линейкой фотодетекторов [119].

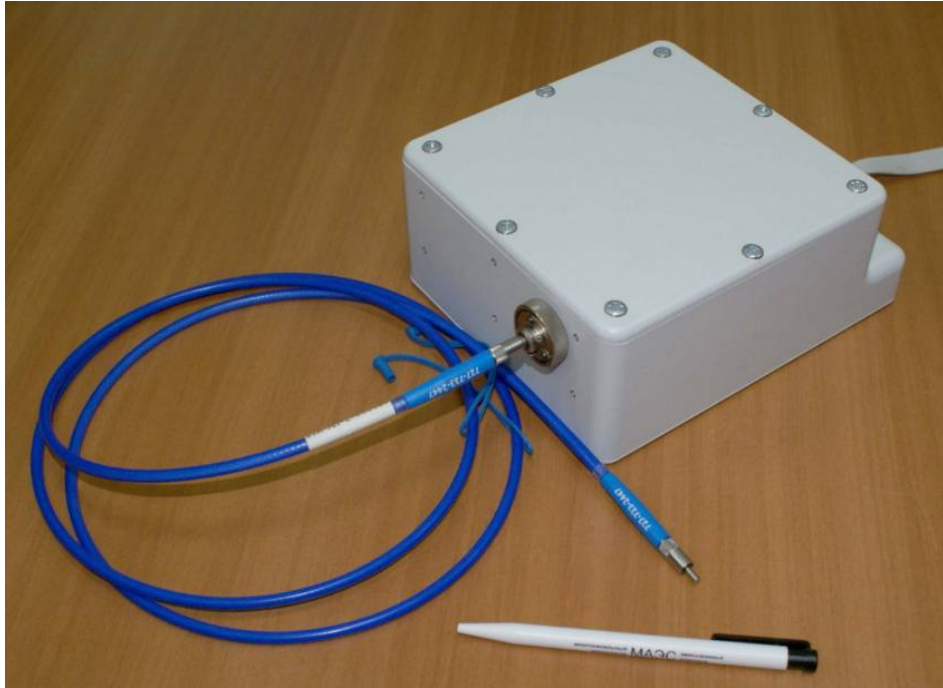


Рисунок 27 – Внешний вид спектрометра «Колибри-2»

Его оптическая схема и конструкция (Рисунок 28) 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. Герметичный корпус спектрометра наполнен инертным газом. Излучение может вводиться в спектрометр с помощью волоконно-оптического кабеля, что может быть использовано для более удобного размещения элементов системы. 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 спектрометра [105; 120].

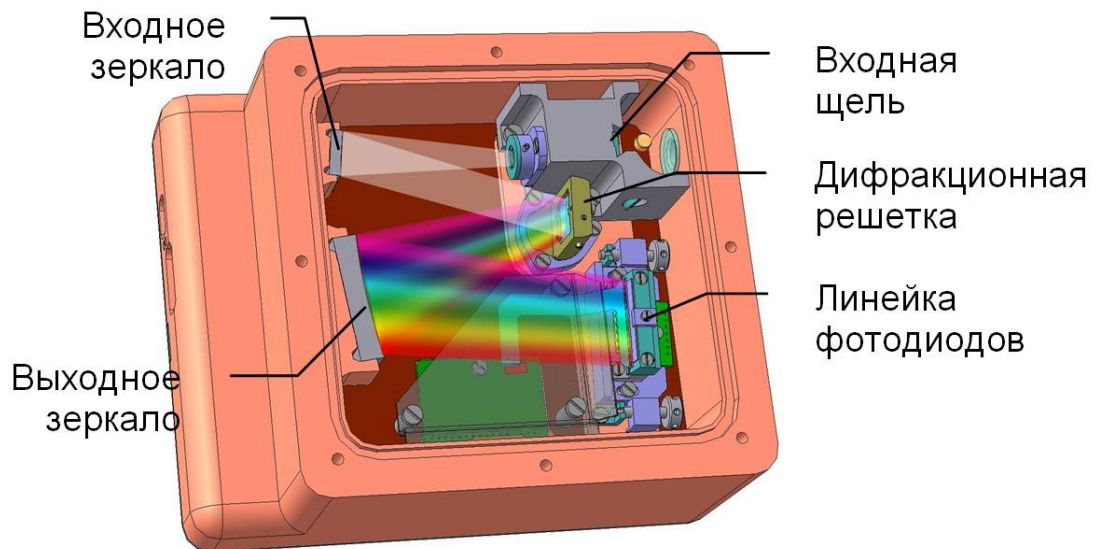


Рисунок 28 – Оптическая схема спектрометра «Колибри-2»

Динамический диапазон спектрометра (при однократной регистрации спектра) составляет 10^4 , уровень рассеянного света – 0,05 %, нелинейность фотоотклика – 0,5 %, количество фотодетекторов – 2612 [121]. Минимальное время экспозиции спектрометра составляет 8 мс, что позволяет применять его в системах контроля в реальном времени. Данное время экспозиции соответствует регистрации более чем 120 спектров в секунду, что превышает стандартную частоту монитора, кроме того, современный компьютер способен решать численную обратную задачу многослойных покрытий примерно на порядок медленнее, что определяет достаточность и даже некоторую избыточность скорости измерения выбранного спектрометра. Во многих случаях возможно увеличение времени экспозиции до 50 – 100 мс с целью повышения отношения сигнал/шум, поскольку даже в этом случае регистрация и визуализация спектров по-прежнему происходят чаще, чем решение обратной задачи для нахождения толщины слоя.

Источник излучения (лампа)

В качестве источника излучения использовался «Ocean Optics HL-2000-FHSA» [106] на основе галогенной лампы с дрейфом менее 0,3 % в час, цветовой температурой 2800 К, выходной мощностью 6,7 мВт. Цветовая температура и

выходная мощность определяют форму непрерывного спектра и применимость источника для работы в выбранном спектральном диапазоне контроля. На Рисунке 29 представлен спектр излучения данного источника, полученный на спектрометре «Колибри-2». Во всём диапазоне 525 – 990 нм спектр имеет достаточную интенсивность, а потому пригоден для использования в качестве элемента разрабатываемой системы контроля. Вблизи 990 нм видно снижение относительной интенсивности до 12 %, что приводит к снижению отношения сигнал/шум в этой спектральной области. Для частичного решения этой проблемы и уменьшения шумов в длинноволновой области рабочего спектрального диапазона можно разместить на входе спектрометра светофильтр для уменьшения интенсивности сигнала в диапазоне 500 – 800 нм и выравнивания интенсивности спектра в диапазоне контроля.

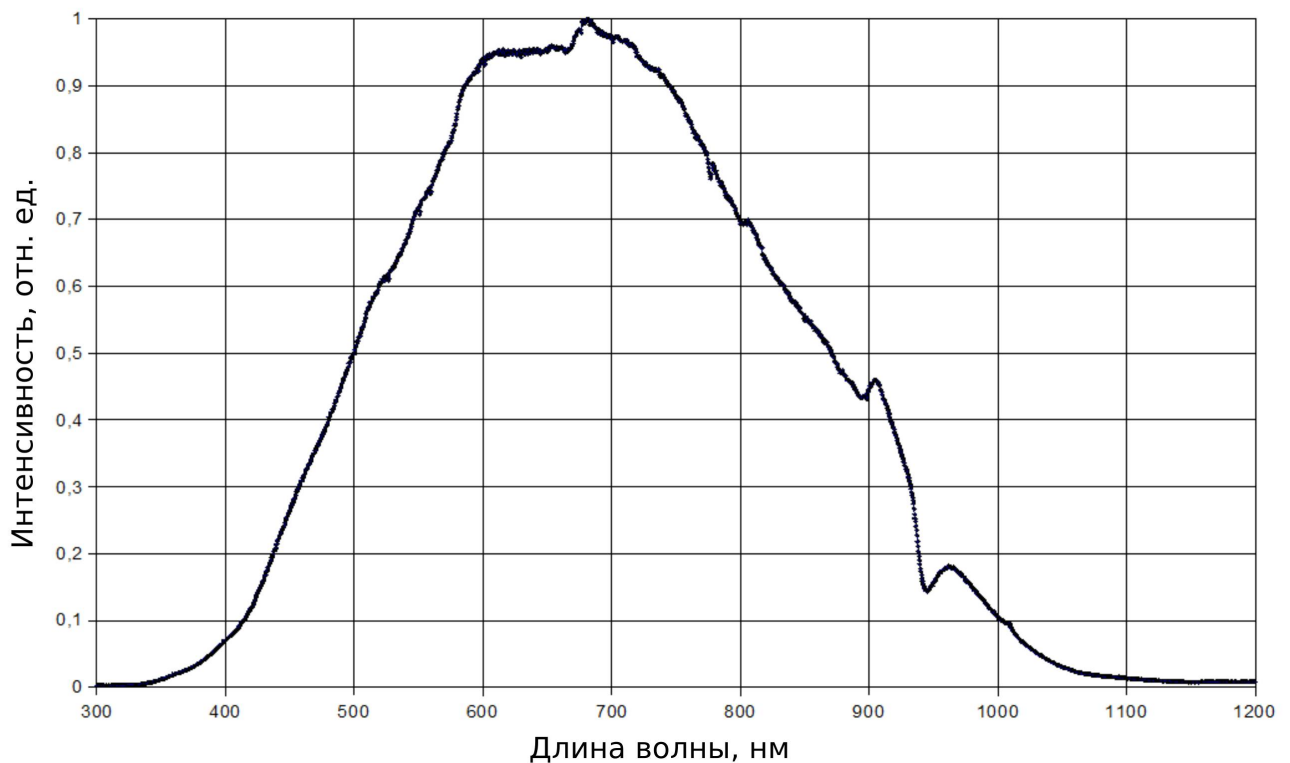


Рисунок 29 – Спектр источника излучения с галогенной лампой HL-2000-FHSA (получен на «Колибри-2»)

Данный источник имеет аттенюатор, позволяющий ослаблять интенсивность излучения вручную, и затвор, управляемый вручную или через цифровой интерфейс RS-232. Как было показано в параграфе 1.2, возможность

изменять интенсивность источника в случае метода непрямого широкополосного контроля по спектрам отражения позволяет использовать динамический диапазон спектрометра наиболее эффективно, повышая итоговый уровень отношения сигнал/шум в регистрируемых спектрах. Изменение интенсивности спектра аттенуатором нужно проводить до нанесения слоя, а не в процессе, поскольку такое изменение требует проведения калибровки сигнала по калибровочной подложке. Основные паспортные характеристики источника приведены в Таблице 3.

Таблица 3 – Характеристики источника HL-2000-FHSA (данные производителя)

Габаритные размеры:	62 x 60 x 150 мм
Выходная мощность:	6,7 мВт
Питание лампы:	12 В, постоянный ток
Спектральный диапазон:	360 – 2400 нм
Дрейф:	не более 0.3 % в час
Время стабилизации:	10 минут
Срок службы лампы:	10 000 ч
Цветовая температура лампы:	2800 К
Диапазон температур:	5 – 35 °С
Допустимая влажность:	5 – 95 % при 40 °С
Вес:	0,5 кг

Оптическая схема системы спектрального контроля

Для системы контроля была использована оптическая схема, представленная на Рисунке 30, которая использует представленные источник излучения и спектрометр. 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 подаётся 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 контрольных подложек 7, 8 и 9 обеспечивает их смену при проведении калибровки системы контроля и изменении материала очередного слоя. Материалы наносятся методом электронно-лучевого испарения из водоохлаждаемых тиглей 5 и 11. Управление системой контроля и расчёт толщины наносимого слоя осуществлялись с помощью программного обеспечения «LayerControl» [122], поддерживающего интеграцию с пакетом численного расчёта «OptiLayer/OptiReOpt» [51].

Вакуумная камера 6 вакуумной установки «ВУ-2М» была модернизирована путём обеспечения жёсткой механической связи между блоком коллиматоров 15 системы контроля и барабаном-держателем контрольных подложек 7, 8 и 9 с помощью устройства сопряжения. Это позволило гарантировать неизменное расположение оптических элементов системы относительно друг друга.

Применение оптоволоконных кабелей с диаметром световода 1 мм позволило сделать систему более компактной, удобной в расположении и юстировке, и поместить её под вакуумной камерой установки «ВУ-2М». Изменением поляризации излучения при прохождении волоконно-оптических кабелей в большинстве случаев можно было пренебречь, поскольку система работает при угле падения контролирующего излучения близком к нормальному, и поляризация не оказывает существенного влияния на амплитуду отражённой волны (это следует из формулы (9) в параграфе 2.2).

Блок коллиматоров 15 обеспечивает юстировку оптической системы контроля, позволяет сфокусировать излучение на подложку (в световое пятно диаметром 6 мм) и собрать отражённое от подложки излучение в оптоволоконный кабель. Наличие волоконных кабелей и блока коллиматоров является основным

отличием использованной оптической системы от общей схемы (Рисунок 13), использованной ранее в исследованиях с помощью компьютерного моделирования. Поскольку данное отличие не является принципиальным, то результаты и выводы, сделанные в ходе моделирования применимы к разрабатываемой системе.

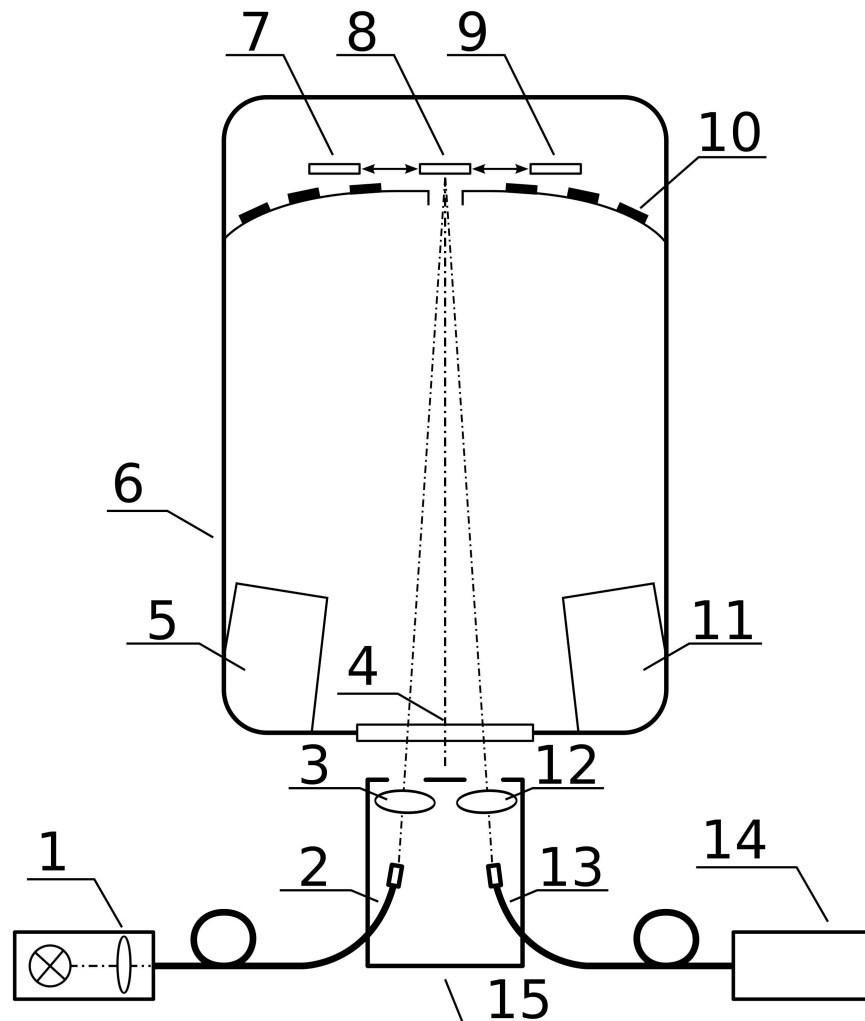


Рисунок 30 – Оптическая схема системы спектрального контроля:

- 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 напыления дополнительные контрольные подложки;
- 8 – контрольная подложка доступная для напыления;
- 10 – рабочие подложки, на которые наносится целевое многослойное покрытие;
- 14 – спектрометр «Колибри-2»; 15 – блок коллиматоров

На Рисунке 31 представлен внешний вид системы спектрального контроля толщин слоёв, которая была установлена на вакуумную установку для нанесения многослойных покрытий «ВУ-2М» в Институте лазерной физики (ИЛФ СО РАН), г. Новосибирск.

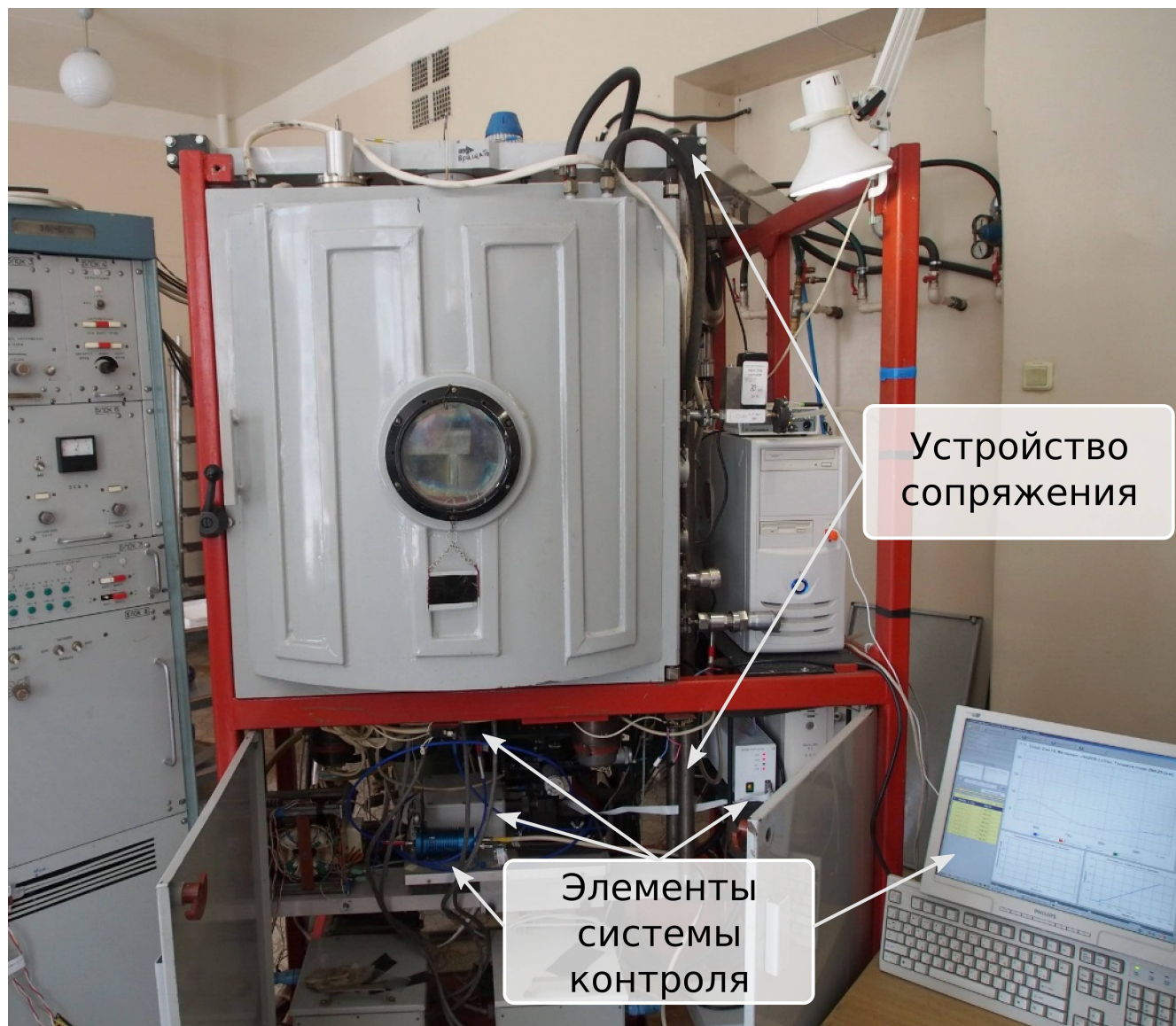


Рисунок 31 – Фотография элементов системы контроля в составе модернизированной вакуумной установки «ВУ-2М»

Программное обеспечение для ведения спектрального контроля

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» [122]. На Рисунке 32 приведено основное окно пользовательского интерфейса. В верхней его части расположена панель калибровки системы и запуска контроля. Самую обширную область занимает графики экспериментального и теоретического коэффициентов отражения, которые показаны синим и красным цветами соответственно, справа от него расположена панель управления графиками. В нижней части находится область с функциями инженера для настройки спектрометра. Слева в программе размещена таблица слоёв и толщин покрытия, которые заложены в его дизайне. Панель текущего состояния позволяет оперативно определить на какой стадии находится покрытие, какой слой и материал в данный момент наносятся.

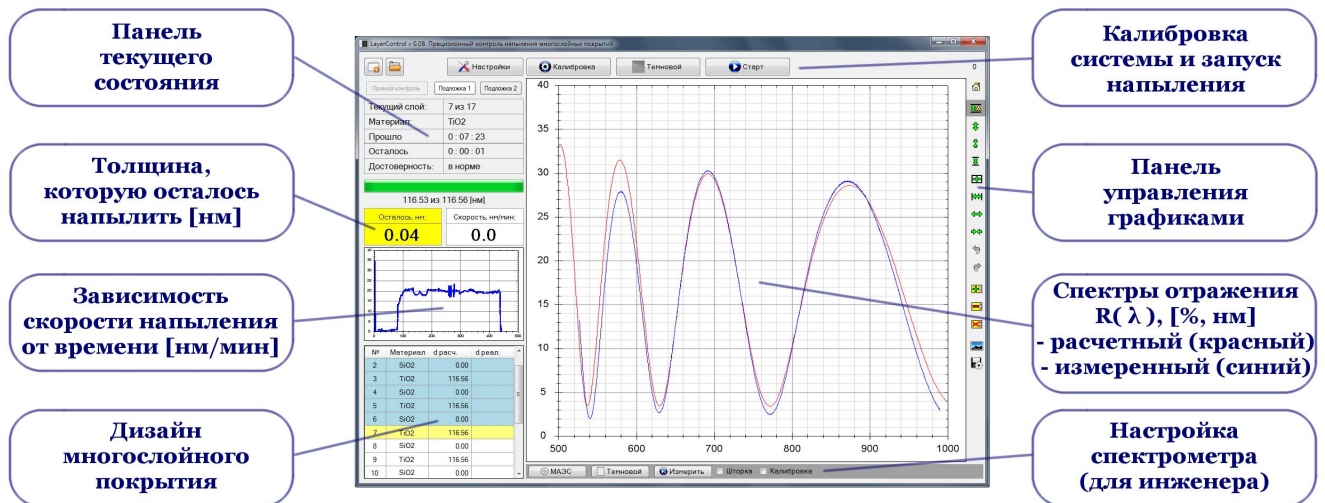


Рисунок 32 – Основное окно пользовательского интерфейса программного обеспечения системы контроля

ПО «LayerControl» поддерживает следующие функции:

1. импорт дизайна покрытия, включающего материалы, порядок и толщины слоёв, из программного обеспечения «OptiLayer» [51];
2. автоматическое разбиение дизайна покрытия в случае применения метода непрямого контроля с использованием дополнительных контрольных подложек;
3. калибровку системы по калибровочной подложке с известным спектром отражения;
4. регистрацию спектра отражения (пропускания) в спектральном диапазоне контроля;
5. визуализацию расчётного и экспериментального спектров отражения (пропускания) в реальном времени;
6. расчёт текущей толщины наносимого слоя и визуализацию её отличия от проектной;
7. сигнализацию оператору о завершении нанесения слоя;
8. визуализацию скорости нанесения для контроля однородности слоя;
9. возможность ручного изменения дизайна покрытия.

Несмотря на то, что решение прямой и обратной задач происходит через библиотеку «OptiReOpt», её наличие не является обязательным для контроля. В случае невозможности взаимодействия с данной библиотекой поддерживается контроль с визуальным сопоставлением графиков и ручным принятием решения об остановке нанесения. Именно такой метод контроля наиболее широко применяется на современных вакуумных установках с системами широкополосного контроля. Если же библиотека «OptiReOpt» доступна, то происходит решение обратной задачи многослойных покрытий и определение толщины слоя в реальном времени. В этом случае окончание нанесения слоя происходит по достижению заданной толщины. В интерфейсе пользователя

выводится не только текущая, но и оставшаяся толщина слоя, а также скорость нанесения в виде зависимости от времени (Рисунок 32). Все вычисления, которые используют библиотеку «OptiReOpt», происходят во вспомогательном программном потоке программы «LayerControl», в результате чего сложность вычислений не влияет на отзывчивость пользовательского интерфейса в ходе контроля, а визуализация регистрируемых спектров происходит независимо от процесса решения обратной задачи.

ПО «LayerControl» поддерживает методы прямого и непрямого широкополосного контроля. При импорте или создании дизайна покрытия есть возможность автоматически разбить его для контроля по дополнительным контрольным подложкам в соответствии со схемой, изображённой на Рисунке 33.

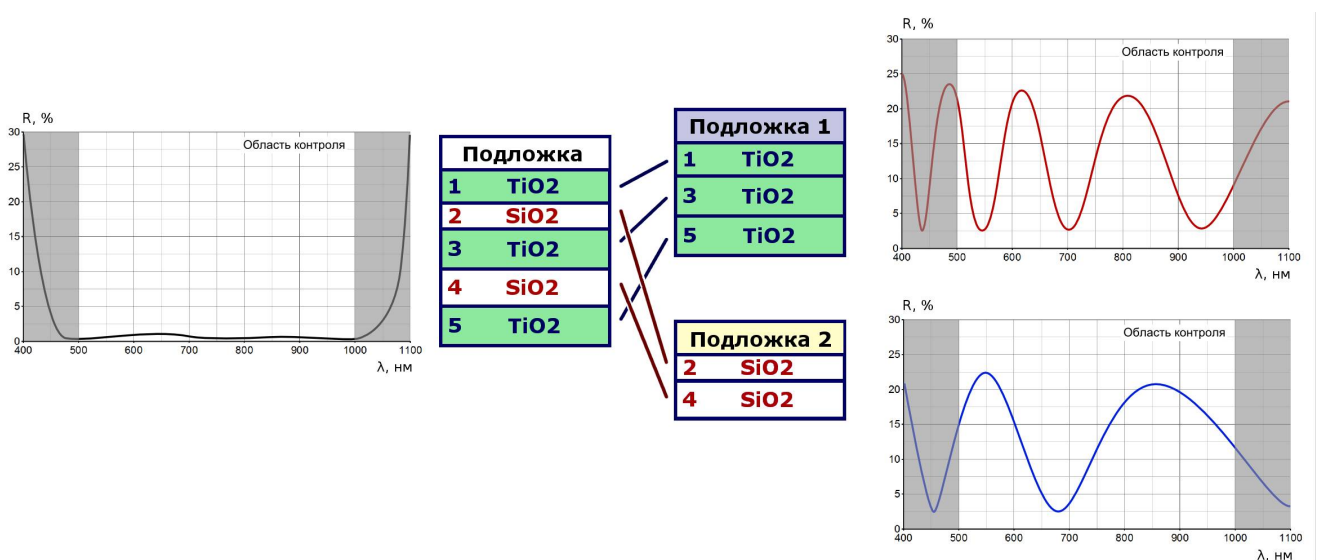


Рисунок 33 – Схема автоматического разбиения слоёв целевого покрытия в ПО «LayerControl» на дополнительные контрольные подложки в случае непрямого широкополосного контроля; зелёным и белым цветом обозначены два разных материала

Важной особенностью ПО «LayerControl» является 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.

Кроме того, на основании информации о измеренных толщинах слоёв и отклонениях от плана нанесения становится возможным перестроить дизайн покрытия (оставшихся слоёв) с целью улучшения итоговых характеристик фильтра, путём изменения толщин оставшихся слоёв прямо в окне программы. Для добавления такой функциональности приходится создавать в памяти компьютера новые экземпляры библиотеки «OptiReOpt» с покрытиями, содержащими измеренные толщины слоёв, поскольку возможность изменения толщины слоя в загруженном дизайне покрытия отсутствует в численной библиотеке «OptiReOpt».

Второй особенностью является возможность переключения в режим визуализации спектров целевого покрытия при использовании метода непрямого широкополосного контроля, когда учитываются характеристики рабочих подложек, которые могут отличаться от контрольных. Благодаря такой функциональности можно определять и визуализировать спектры отражения или пропускания создаваемых фильтров на рабочих подложках в реальном времени, не имея при этом возможности зарегистрировать их напрямую. Этим приёмом удаётся устранить один из недостатков непрямого контроля – отсутствие наглядности и информации о спектральных характеристиках рабочего покрытия. Для добавления такой функциональности, которая отсутствует в «OptiReOpt», также приходится использовать механизм создания нескольких дополнительных экземпляров библиотеки.

Третьей особенностью ПО «LayerControl» является возможность сохранения последовательности зарегистрированных спектров отражения или пропускания в ходе нанесения всего покрытия для последующего анализа всего процесса нанесения. Сохраняемые данные являются частью журнала создания покрытия и позволяют после нанесения покрытия или в ходе его создания провести анализ с целью определения причин возможного отклонения получаемых спектральных характеристик от расчётных. Сохранённая последовательность спектров отражения (или пропускания) во времени соответствует трёхмерной поверхности.

На Рисунке 34 представлен пример такой поверхности, где по одной горизонтальной оси отложен спектральный диапазон контроля, по другой – время в секундах, а по вертикальной оси – коэффициент отражения от покрытия в процентах, которому соответствует цвет поверхности. ПО «LayerControl» позволяет сохранять все измерения или использовать сокращённый вариант с прореженным сохранением. Размер сохраняемых данных может быть существенными, например, в случае использования экспозиции (8 мс) и полного сохранения всех спектров формируемый поток данных может достигать 4,4 ГиБ/час (гигабайт в час).

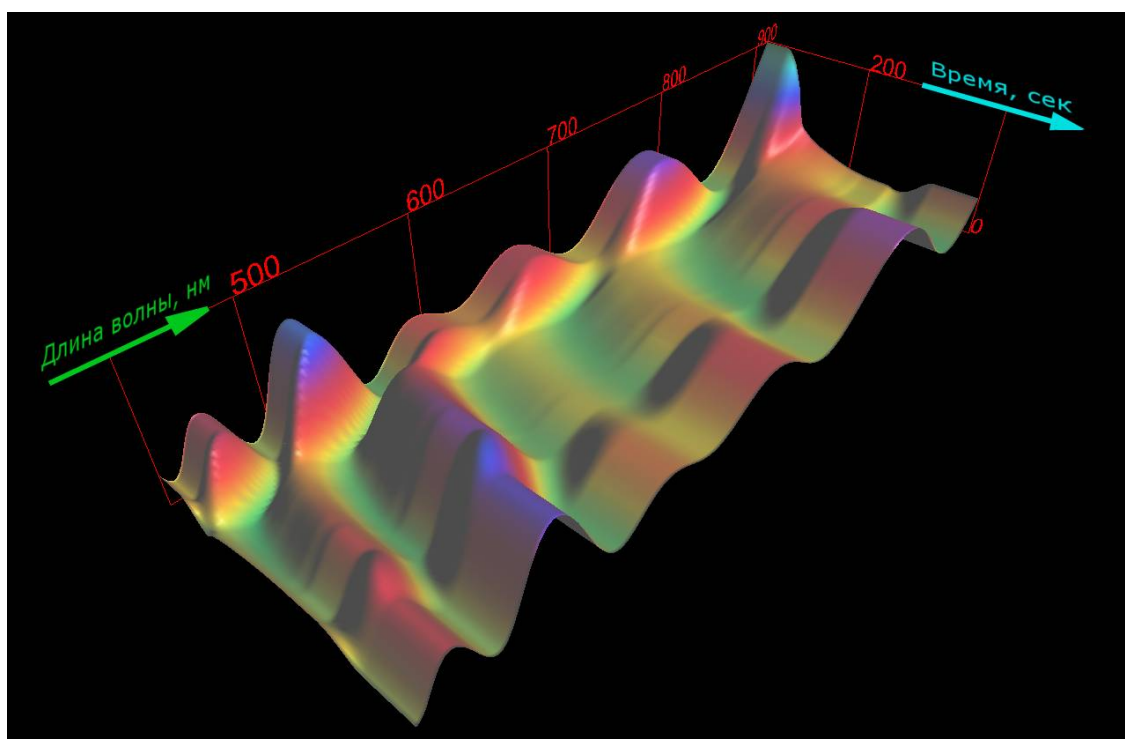


Рисунок 34 – Пример сохранённой трёхмерной зависимости коэффициента отражения от длины волны и времени нанесения

Для автоматической фиксации показаний аналоговых приборов вакуумной установки или фотофиксации процесса испарения наносимого материала возможно применение программной библиотеки для работы с видеокамерами [123]. Видеокамера может быть подключена по USB или через композитный RCA-разъём к управляющему компьютеру и периодически опрашиваться с целью сохранения получаемых кадров в журнал нанесения.

4.2 Технология контроля нанесения покрытия

Калибровка сигнала по интенсивности

Коэффициент отражения контрольной подложки $R(\lambda)$, зависящий от длины волны, находится в разработанной системе контроля из регистрируемых спектров по формуле (13):

$$R(\lambda) = R_K(\lambda) \frac{U(\lambda) - U_T(\lambda)}{U_K(\lambda) - U_T(\lambda)}, \quad (13)$$

где

- $R_K(\lambda)$ – коэффициент отражения калибровочной подложки;
- $U(\lambda)$ – выходной сигнал спектрометра во время проведения контроля;
- $U_K(\lambda)$ – выходной сигнал спектрометра при установке калибровочной подложки в область контроля;
- $U_T(\lambda)$ – выходной сигнал спектрометра в отсутствии излучения (темновой сигнал).

Измерение сигналов $U_T(\lambda)$ и $U_K(\lambda)$ проводится спектрометром системы контроля в процессе калибровки, а $R_K(\lambda)$ предварительно однократно измеряется с более высокой точностью на стационарном спектрометре. Обратная сторона контрольных подложек матируется, чтобы существенно ослабить вклад излучения, отражённого от второй границы подложки, в регистрируемые спектры.

В соответствии с рекомендациями, сформулированными в главе 2 при исследовании с помощью компьютерного моделирования, 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 измерения её спектров отражения. Калибровка по калибровочной подложке является штатной функцией в программном обеспечении системы контроля.

Создание покрытия с разработанной системой контроля

Система спектрального контроля толщин слоёв была установлена на вакуумную установку для нанесения многослойных покрытий «ВУ-2М» в Институте лазерной физики (ИЛФ СО РАН), г. Новосибирск. Рассмотрим технологию создания многослойного диэлектрического покрытия на вакуумной установке, оснащённой разработанной системой контроля, с применением метода непрямого контроля в широком спектральном диапазоне.

Первым этапом создания покрытия является расчёт конфигурации слоёв (синтез дизайна покрытия) для доступных материалов и подложек, который позволит получить покрытие, решающее спектральную задачу. Такой расчёт проводится в программном пакете численного расчёта «OptiLayer».

Далее дизайн покрытия напрямую импортируется в программное обеспечение системы контроля «LayerControl». При этом дизайн покрытия может быть автоматически разбит на несколько дополнительных контрольных подложек в соответствии со схемой на Рисунке 33.

Затем на вакуумной установке вращением держателя контрольных подложек выставляется калибровочная подложка в область светового пятна системы контроля. Система проводит калибровку путём измерения темнового сигнала $U_T(\lambda)$ и спектра калибровочной подложки $U_K(\lambda)$. Коэффициент отражения $R(\lambda)$ вычисляется из входного сигнала спектрометра $U(\lambda)$ в соответствии с формулой (13).

После этого выставляется текущая контрольная подложка и проводится нанесение очередного слоя. Нанесение покрытия контролируется в реальном времени программным обеспечением с визуализацией спектра отражения в диапазоне контроля 525 – 990 нм и математическим расчётом толщины наносимого слоя с помощью решения обратной задачи.

Контроль скорости нанесения и неоднородность внутри слоёв

Если в ходе напыления очередного слоя скорость нанесения материала не является постоянной, то внутри слоя происходит появление неоднородностей показателя преломления по толщине слоя. Неоднородности внутри слоя приводят к ухудшению качества покрытия, поскольку экспериментальные спектры пропускания и отражения таких слоёв отличаются от расчётных. Чтобы уменьшить данный негативный эффект следует наносить слои с постоянной скоростью нанесения, оптимальной для выбранного материала, механизма распыления и ассистирования.

На разработанной системе контроля в процессе нанесения слоя в реальном времени осуществляется расчёт не только толщины слоя, но и скорости его нанесения. На Рисунке 35 приведены зависимости скорости нанесения [нм/мин] от времени [секунды], полученные *in situ* на вакуумной установке в процессе нанесения в разработанном программном обеспечении «LayerControl». Возможность построения скорости нанесения в реальном времени позволила соответствующим образом изменять мощность испарителей вакуумной установки с целью поддержания скорости нанесения близкой к постоянной величине. Видно, что для материала TiO_2 в экспериментах удавалось держать скорость нанесения достаточно постоянной в окрестности проектного значения 20 нм в минуту (Рисунок 35а, при этом отклонения скорости составляли, как правило, менее 20 % на протяжении всего процесса нанесения слоя (продолжительность около 6 минут). Для материала SiO_2 непостоянство скорости нанесения оказывает меньшее влияние на однородность получаемого слоя и потому скорость не выдерживалась постоянной (Рисунок 35б). Тем не менее, то, что нанесение некоторых материалов может идти существенно неравномерно, приводит к появлению риска «перепылить» слой, то есть нанести больше материала, чем требуется по расчёту. Это может произойти в том случае, если скорость нанесения возрастёт (например, до 60 нм в минуту и более) в момент, когда требуется прекращать напыление текущего слоя. Частичным решением данной проблемы

является *плавное* снижение мощности испаряющего материал луча при приближении к концу слоя, и соответствующее снижение скорости нанесения, например, для SiO₂ до 10 – 15 нм в минуту.

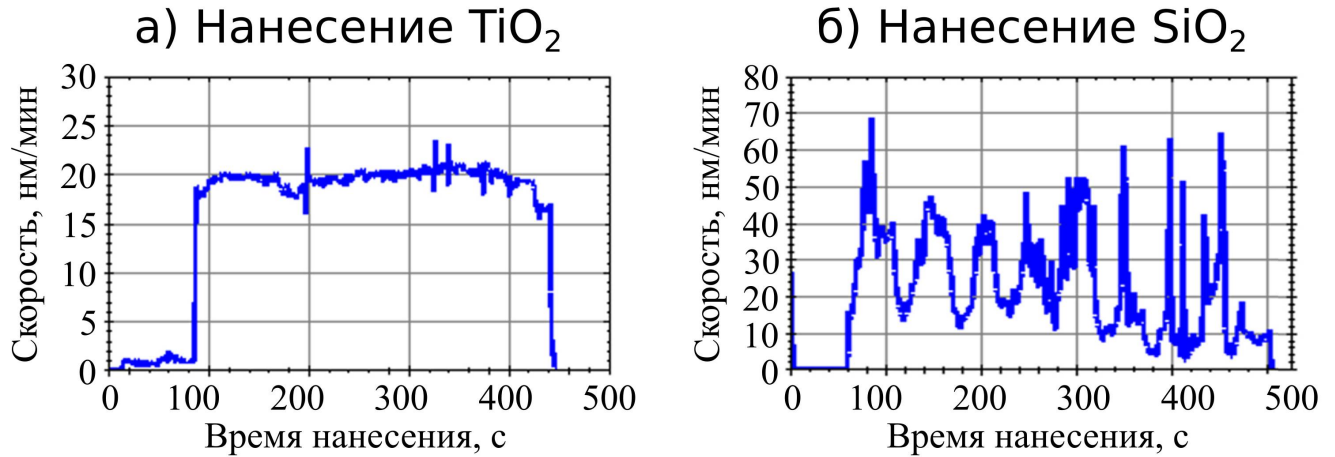


Рисунок 35 – Зависимость скорости нанесения материала слоя от времени, полученная в программном обеспечении «LayerControl», в случае нанесения: а) – слоя TiO₂, б) – слоя SiO₂

«Паразитное подпыление» при закрытых заслонках

Благодаря расчёту скорости нанесения в реальном времени на используемой вакуумной установке был обнаружен эффект «паразитного подпыления» при закрытой заслонке (когда материал из тигля должен быть закрыт от испарения на подложки заслонкой). Данный эффект можно видеть на Рисунке 36, где изображена зависимость скорости нанесения материала TiO₂ от времени, полученная в программном обеспечении «LayerControl». В конце нанесения видна ненулевая скорость, хотя процесс нанесения слоя уже закончен, и заслонка закрыта. Эта скорость нежелательного нанесения составляла около 2-3 нм в минуту, что соответствует 10 - 15 % от рабочей скорости нанесения. Обнаружение данного негативного эффекта позволило устранить его на вакуумной установке путём не только закрытия заслонки, но и выключения тока накала испарителя по окончании нанесения слоя.

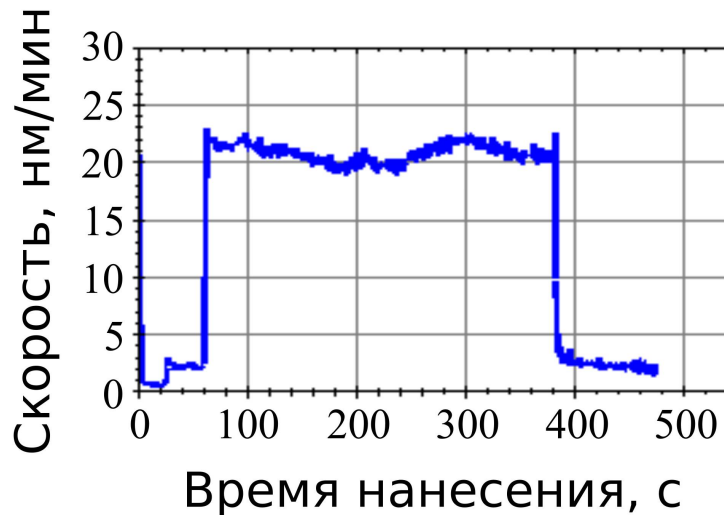


Рисунок 36 – Зависимость скорости нанесения TiO_2 [нм/мин] от времени [с], полученная в программном обеспечении «LayerControl»

Характеристики разработанной системы контроля

При использовании метода непрямого широкополосного контроля по спектрам отражения на вакуумной установке, оснащённой системой контроля, при выполнении рекомендаций, полученных при проведённых исследованиях с помощью 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.

Для демонстрации достоверности измерений коэффициентов отражения на разработанной системе контроля на Рисунке 37 приведено измерение коэффициента отражения многослойного просветляющего покрытия для диапазона длин волн 400 – 700 нм. Красным графиком изображено одно из измерений спектрометра системы контроля «Колибри-2», полученное в реальном времени, а синему – измерение с помощью стационарного спектрометра с большим временем экспозиции уже после извлечения покрытия из камеры.

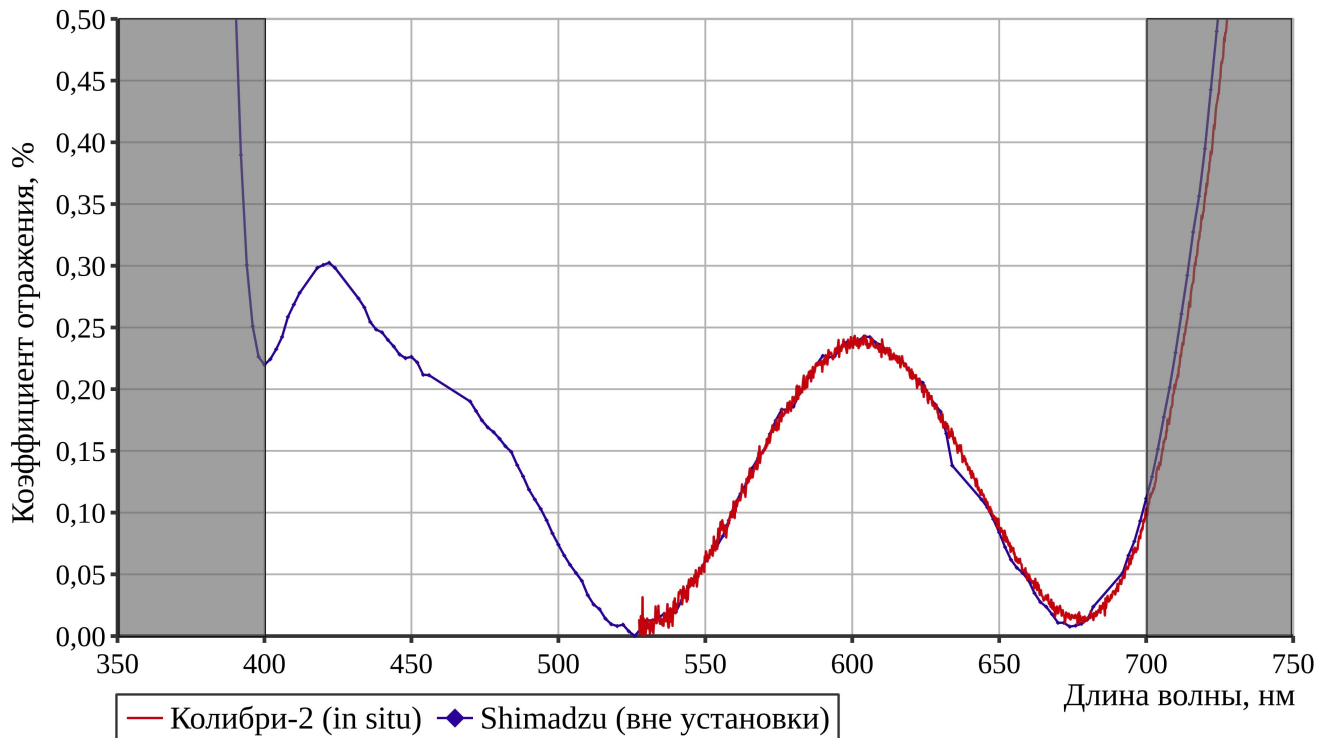


Рисунок 37 – Спектр отражения (в процентах) многослойного просветляющего покрытия для диапазона длин волн 400 – 700 нм, красным – зарегистрированный спектрометром системы контроля «Колибри-2» (*in situ*), синим – стационарным спектрометром «Shimadzu» (уже вне установки)

Необходимо заметить, что на красном графике Рисунка 37 представлен наибольший из возможных относительный уровень шума для спектров, регистрируемых системой контроля в данном спектральном диапазоне, поскольку измерялся очень низкий коэффициент отражения, соответствующий высокоэффективному просветляющему покрытию (менее 0,3 % во всём рабочем диапазоне длин волн). Из сравнения графиков на Рисунке 37 видно, что даже в этом случае коэффициенты отражения, измеряемые системой контроля, были достоверными и сопоставимыми с результатами измерения стационарным спектрометром вне установки с большими временами экспозиции.

4.3 Применение системы контроля

На вакуумной установке «ВУ-2М», оснащённой разработанной системой контроля, были изготовлены сотни многослойных оптических покрытий: зеркала, отрезающие фильтры, просветляющие покрытия в широком спектральном диапазоне, узкополосные фильтры и другие.

Создание просветляющего покрытия

В качестве примера изготовленных с применением системы контроля фильтров можно рассмотреть решение актуальной задачи создания просветляющего покрытия (AR-фильтра) [76; 78; 124] для видимого диапазона излучения с целью повышения коэффициента светопропускания прибора Новосибирского приборостроительного завода, г. Новосибирск. Требовалось получить коэффициент отражения от подложки с покрытием не более 0,3 % в спектральном диапазоне чувствительности человеческого глаза 400 – 670 нм. Для изготовления просветляющего покрытия были использованы материалы TiO_2 , SiO_2 и MgF_2 . Дизайн покрытия содержал 9 слоёв. На Рисунке 38 приведён спектр отражения созданного просветляющего покрытия. В спектральном диапазоне 400 – 670 нм покрытие имеет максимальный коэффициент отражения **0,15 %**, что близко к результатам численного расчёта и с запасом удовлетворяет требованиям поставленной задачи.

В настоящее время типичный коэффициент отражения для покрытий с просветлением в диапазоне чувствительности человеческого глаза, изготовленных на отечественных оптико-механических заводах, составляет около 1 % и более, что в 7 раз больше, чем максимальный уровень отражения покрытия, полученного на установке, оснащённой системой контроля (Рисунок 38).

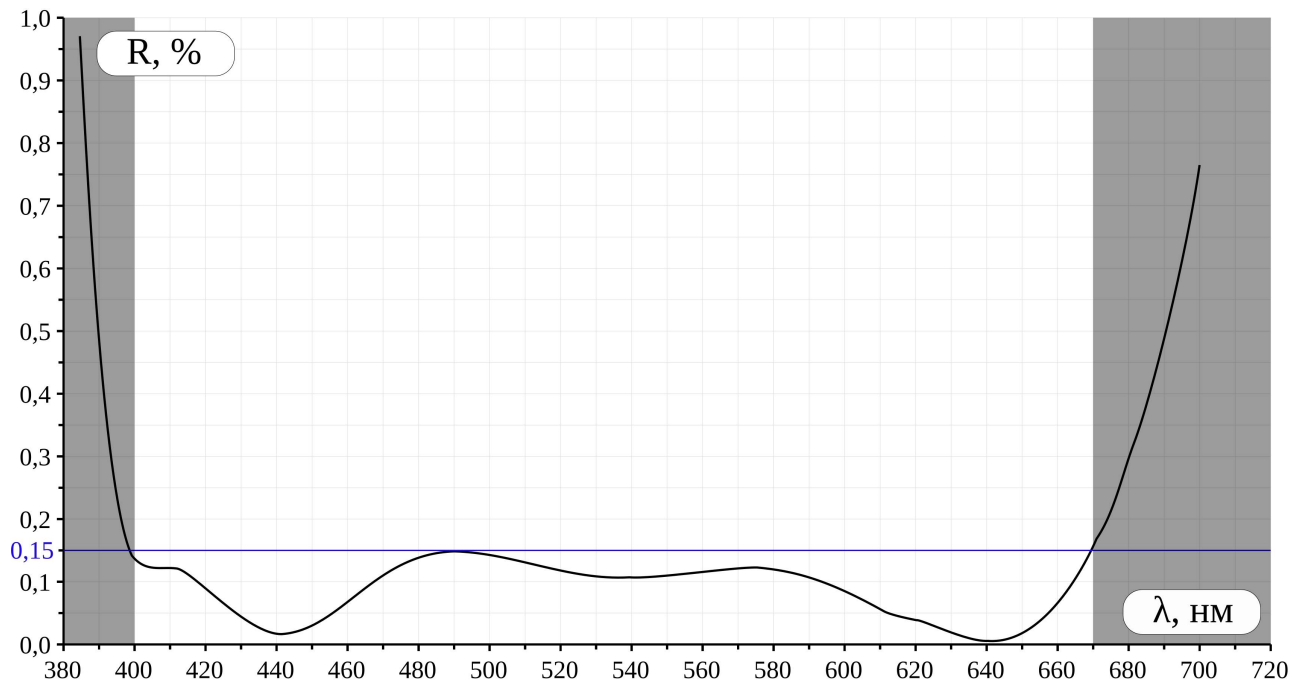


Рисунок 38 – Спектр отражения просветляющего покрытия (AR-фильтра), полученного на установке, оснащённой разработанной системой контроля

Для сравнения полученного результата с мировым уровнем промышленных решений были рассмотрены различные производители просветляющих покрытий разных стран мира (США, страны ЕС, Китай, Индия и другие). Главными критериями эффективности просветляющих покрытий рассматривалось интегральное и максимальное значения коэффициента отражения в требуемом спектральном диапазоне (в данном случае 400 – 670 нм). В ассортименте компаний выбирались фильтры, покрывающие требуемый спектральный диапазон и имеющие в нём минимальный уровень коэффициента отражения, то есть брались наилучшие решения данных производителей для поставленной спектральной задачи. Характеристики выбранных решений были взяты из спецификаций покрытий (при наличии), либо из описания на официальных сайтах. Спектральные характеристики были перенесены вручную на один график для возможности объективного сравнения. На Рисунке 39 представлены результаты данного исследования, где 1 – покрытие, полученное на вакуумной установке «ВУ-2М» в ИЛФ СО РАН, оснащённой разработанной системой контроля, а 2 ÷ 6 лучшие промышленные решения различных производителей.

Чем меньше на графиках коэффициент отражения, тем лучше и эффективнее просветляющее покрытие.

Из Рисунка 39 видно, что созданное покрытие не только не уступает, но и превосходит рассмотренные покрытия 2 ÷ 6. По максимальному и интегральному значениям коэффициента отражения созданное покрытие является лидером среди лучших серийных промышленных решений, предлагаемых рассмотренными производителями.

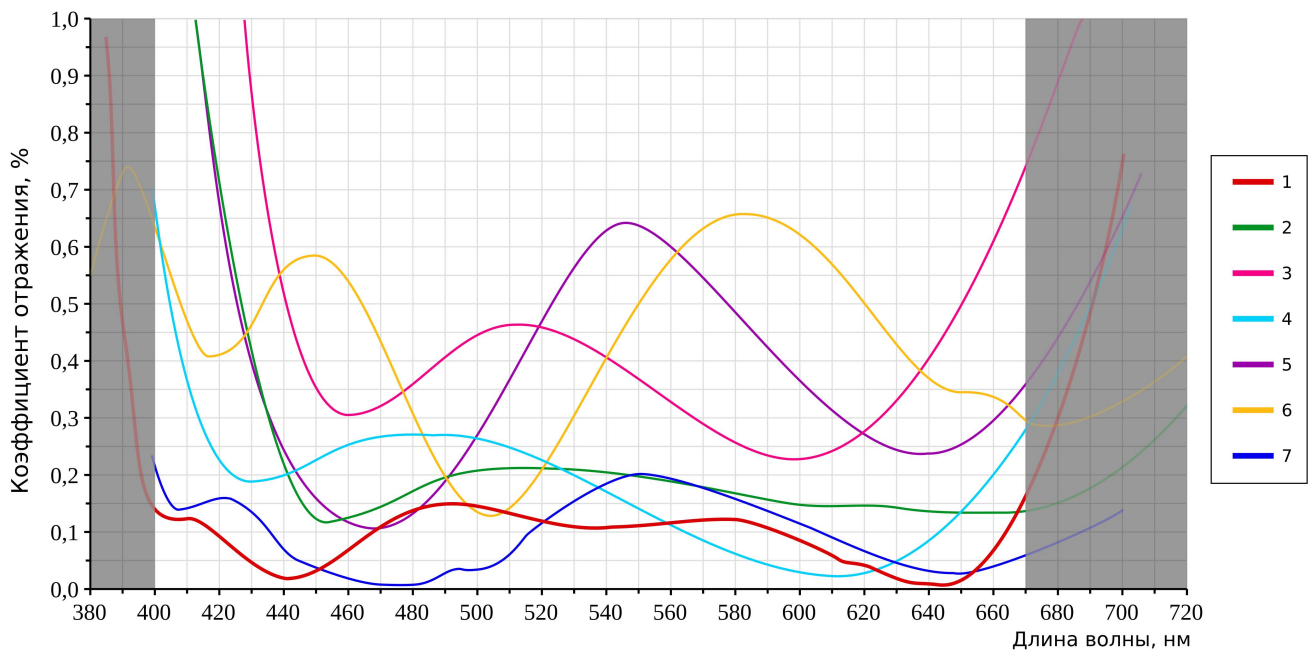


Рисунок 39 – Сравнение спектров отражения подложек

с просветляющими многослойными покрытиями
(меньше коэффициент отражения – лучше), где

1 – Полученное покрытие (г. Новосибирск, Россия),

2 – WTS Photonics CO. Ltd (Китай),

3 – AC-110. AccuCoat, Inc. (г. Рочестер, штат Нью-Йорк, США),

4 – AC-140. AccuCoat, Inc. (г. Рочестер, штат Нью-Йорк, США),

5 – TSP Inc. Duravue-7000 (г. Батавия, штат Огайо, США),

6 – NHV Technologies (Индия; США; Великобритания),

7 – Из публикации [125] (Институт Фраунгофера, Германия)

Для сравнения с мировым научным уровнем было рассмотрено покрытие, полученное в работе [125], посвящённой проблемам создания высококачественных просветляющих покрытий. Целью автора работы являлось

нанесение просветляющего покрытия с минимальным коэффициентом отражения в широком спектральном диапазоне. На Рисунке 39 коэффициент отражения покрытия, полученного в этой работе, представлен под номером 7. Коэффициент отражения в рассматриваемом диапазоне у автора получился примерно того же уровня, что и у созданного покрытия 1 (Рисунок 39, сравнение графиков 7 и 1), однако автор решал более сложную задачу – его покрытие создавалось для более широкого диапазона 400 – 1200 нм. Другим отличием является то, что в работе [125] использовалось несколько специфических синтезированных материалов с низким показателем преломления для создания «ступенчатого» профиля коэффициента преломления, а покрытие 1 было получено с использованием легкодоступных материалов (TiO_2 , SiO_2 , MgF_2), широко применяемых в промышленности, что с практической точки зрения является достоинством.

Таким образом, на вакуумной установке, оснащённой разработанной системой контроля, удалось получить высокоэффективные просветляющие покрытия с максимальным коэффициентом отражения для диапазона 400 – 670 нм – 0,15 %, и интегральным – на уровне 0,08 %. Проведено исследование рынка серийных промышленных решений и лабораторных результатов и установлено, что полученное покрытие зачастую превосходит результаты промышленных современных образцов просветляющих покрытий, и сопоставимо с мировым уровнем в данной области. Применение данных высокоэффективных просветляющих покрытий Новосибирским приборостроительным заводом позволило им повысить коэффициент светопропускания изготавливаемого прицела (изделие ПО525) в этом диапазоне до 91,5 %, что соответствует по данному параметру лучшим зарубежным аналогам.

Покрытия, используемые вне диапазона контроля

Разработанная система со спектральным диапазоном контроля 525 – 990 нм позволяет контролировать создание покрытий, работающих в других спектральных диапазонах. Так, например, на вакуумной установке «ВУ-2М» в ИЛФ СО РАН, оснащённой разработанной системой контроля, были изготовлены

зеркала для инфракрасного диапазона 2600 – 3400 нм. В таких случаях основным требованием является достаточная прозрачность используемых для покрытия материалов в диапазоне контроля.

Технология широкополосного контроля позволяет создавать даже сложные спектральные фильтры вне диапазона контроля, однако при этом требуется достаточно точно знать характеристики наносимых материалов, как в диапазоне контроля, так и в рабочем диапазоне, что не всегда возможно.

Создание фильтров для подавления нерабочих порядков в дифракционных спектрометрах

В разработанной системе контроля применяется малогабаритный спектрометр «Колибри-2», созданный по оптической схеме Черни-Тёрнера на основе плоской дифракционной решётки и работающий в первом порядке дифракции. Известно, что в спектрометрах с дифракционными решётками присутствуют спектры различных порядков [105] и возможно наложение на первый рабочий порядок дифракционного спектра «Колибри-2» более высоких нерабочих порядков. Это происходит в спектрометрах с рабочим спектральным диапазоном $[\lambda_{\min}; \lambda_{\max}]$, в случае, если $2\lambda_{\min} < \lambda_{\max}$. Такое наложение делает сложным анализ зарегистрированных спектров – в линейчатых спектрах появляются линии нерабочих порядков, которые могут накладываться на анализируемые линии, а в случае сплошных спектров работа вообще становится невозможна. Именно из-за этого эффекта в системе контроля использовался диапазон 525 – 990 нм, не дающий наложения нерабочих порядков на рабочий (излучение с длиной волны до 525 нм отсекается фильтром). Использование данного спектрометра в настоящее время расширяется в различные области: фотометрию пламени, спектрофотометрию, колориметрию и другие [73]. Существует восемь вариантов исполнения спектрометра «Колибри-2» по рабочему спектральному диапазону и разрешению [119; 121], в том числе диапазоны, для которых $2\lambda_{\min} < \lambda_{\max}$, а значит, присутствуют наложения порядков. Например, в спектрометре «Колибри-2» со

спектральным диапазоном 190 – 1100 нм наряду с первым порядком спектра присутствуют нерабочие порядки до пятого включительно.

Одним из эффективных методов исключения попадания излучения нерабочих порядков дифракционного спектра на фоточувствительную поверхность линейки фотодетекторов в малогабаритных спектрометрах является установка перед ней дихроичных фильтров на основе многослойных покрытий, которые отражают излучение в коротковолновой области и пропускают в длинноволновой (Рисунок 40). Конфигурация из нескольких таких фильтров, установленная перед линейкой фотодетекторов, позволяет очистить спектр рабочего диапазона от излучения нерабочих порядков спектра. Именно такой комбинированный фильтр и требовалось создать на вакуумной установке, оснащённой разработанной системой контроля, для подавления нерабочих порядков дифракционного спектра в малогабаритном спектрометре «Колибри-2».

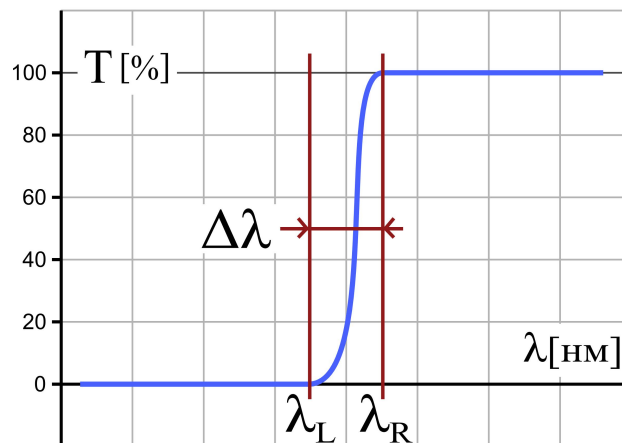


Рисунок 40 – Спектр пропускания дихроичного (отрезающего) фильтра

Общий расчёт конфигурации (расположение и спектр пропускания) таких фильтров изложен в [120]. Используя его, можно рассчитать конфигурацию фильтров для спектрометра «Колибри-2», которая позволит регистрировать спектры во всём спектральном диапазоне 190 – 1100 нм без наблюдения вклада нерабочих порядков спектра. Поскольку динамический диапазон спектрометра «Колибри-2» составляет 10^4 , то для полного подавления нерабочих порядков максимальный коэффициент пропускания в коротковолновой области фильтра

должен быть не больше 10^{-4} (или 0,01 %). Для создания комбинированного фильтра для диапазона 190 – 1100 нм требуется как минимум 2 дихроичных фильтра [120]:

$$N = \left\lceil \log_2 \left(\frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}} \right) \right\rceil = \left\lceil \log_2 \left(\frac{1100}{190} \right) \right\rceil = \lceil 2,53 \rceil = 2 \quad (14)$$

Пространственная и спектральная конфигурации набора фильтров для такого случая изображены на Рисунке 41. Используются два многослойных покрытия, нанесённых на подложку, прозрачную для всего рабочего диапазона $[\lambda_{\min}; \lambda_{\max}]$. Под каждым пространственным участком фильтра изображён спектр пропускания всего набора.

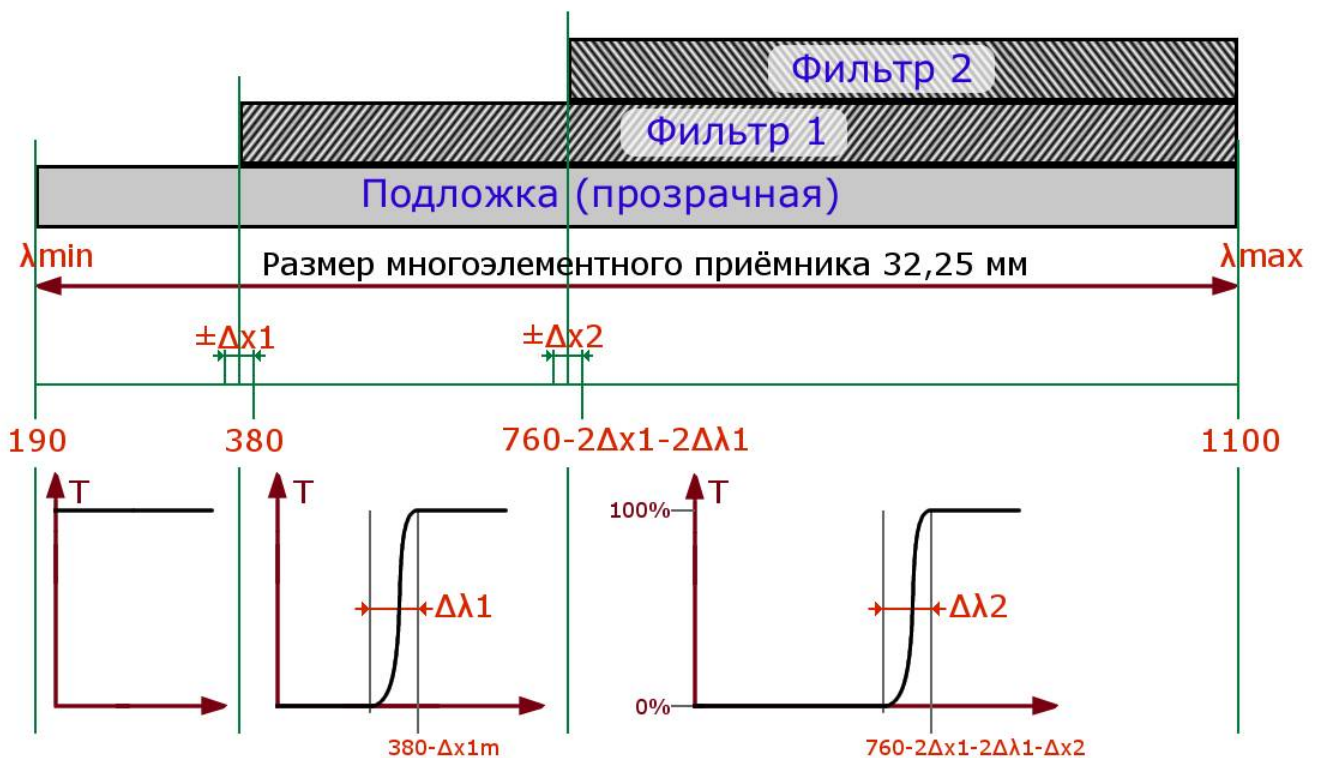


Рисунок 41 – Пространственная и спектральная конфигурации набора фильтров, где Δx_i – погрешность позиционирования края фильтра, $\Delta \lambda_i$ – ширина спектрального перехода фильтра

Для расчётов была создана электронная таблица в ПО «LibreOffice Calc» (Рисунок 42), которая связала анализируемые параметры. Таблица позволяет

задавать входные параметры (отмеченные красным цветом), и находить выходные параметры (отмеченные зелёным цветом). Входными параметрами являются точности позиционирования фильтров на линейке и ширина перехода первого фильтра. Дополнительными входными данными являются: спектральный рабочий диапазон спектрометра (190 – 1100 нм), размер линейки фотодетекторов (32,25 мм), количество фотодетекторов (2612 шт). Выходными параметрами являются положения спектральных переходов, ширина перехода второго фильтра и положение фильтров на линейке.

Фильтр 1				
		в х, мм	в λ, нм	в диодах
λ_L	Начало перехода		310,32	
λ_R	Конец перехода		375,32	
$\Delta\lambda_1$	Ширина перехода	2,08	65,00	167
λ_1	Позиция на линейке	5,95	377,66	476
Δx_1	Точность позиционирования	0,15	4,68	12
Фильтр 2				
		в х, мм	в λ, нм	в диодах
λ_L	Начало перехода		550,00	
λ_R	Конец перехода		605,04	
$\Delta\lambda_2$	Ширина перехода	1,76	55,04	141
λ_2	Позиция на линейке	13,49	612,84	1079
Δx_2	Точность позиционирования	0,50	15,60	40

Рисунок 42 – Внешний вид электронной таблицы для расчёта параметров фильтра порядков с результатом расчёта для спектрометра «Колибри-2»

Было предложено ещё одно техническое решение для улучшения результата. Поскольку подложка может быть несколько длиннее необходимого размера и возможно её перемещение относительно линейки фотодетекторов внутри спектрометра, то путём точной юстировки можно почти полностью компенсировать погрешность расположения одного из фильтров. В случае двух фильтров это означает, что погрешность установки одного из них можно считать относительно малой, а определяющую роль после юстировки будет иметь погрешность расположения второго фильтра. С учётом этой оптимизации и возможностей вакуумной установки был предложен расчёт конфигурации, представленный на Рисунке 42. В конфигурации присутствуют два фильтра с

шириной спектрального перехода 65 и 55 нм соответственно. При этом погрешность позиционирования первого фильтра была выбрана всего 0,15 мм, а для второго 0,50 мм.

В соответствии с данным расчётом положений фильтров, допускам по позиционированию фильтров, ширин и расположений спектральных переходов было произведено моделирование и синтез многослойных покрытий и на вакуумной установке, оснащённой системой спектрального контроля, были нанесены комбинированные фильтры из двух дихроичных фильтров на подложке с применением материалов TiO_2 , SiO_2 и MgF_2 [120]. Спектры пропускания полученных фильтров показаны на Рисунке 43. Степень подавления излучения в коротковолновой области таких дихроичных зеркал составила 10^5 и 2×10^4 для первого и второго фильтра соответственно, что полностью решает проблему нерабочих порядков дифракционного спектра в спектрометре «Колибри-2».

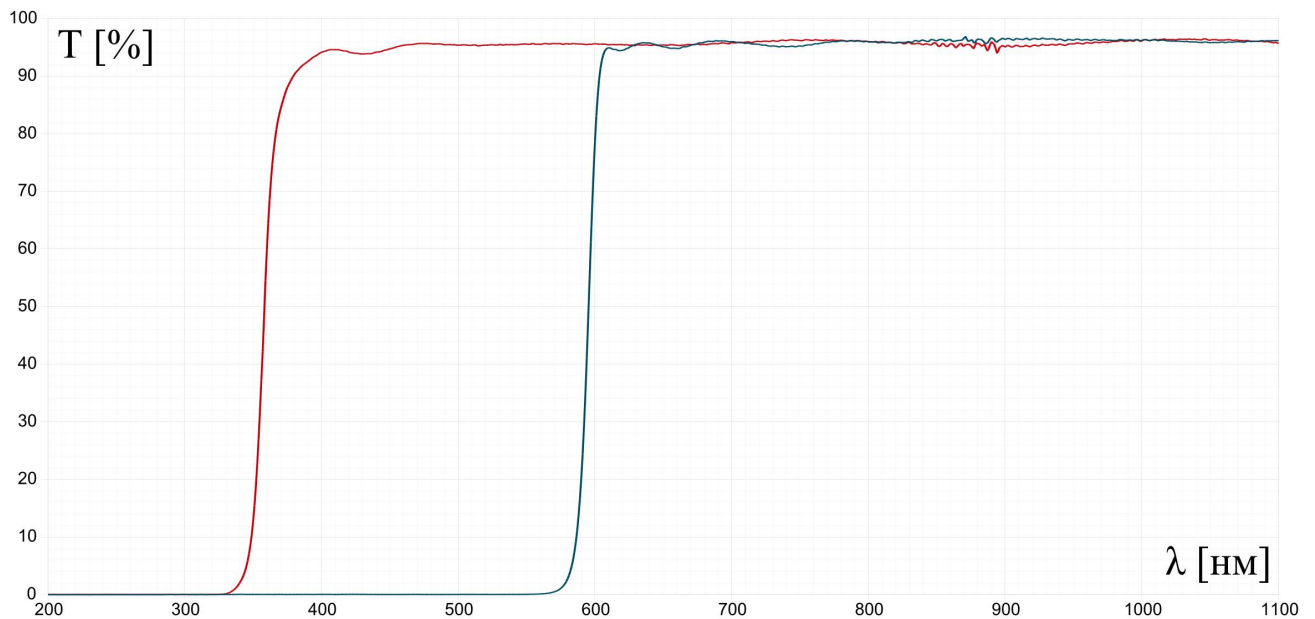


Рисунок 43 – Спектры пропускания созданных дихроичных фильтров в рассчитанной улучшенной конфигурации

Для демонстрации работы фильтра на Рисунке 44 показаны обзорные спектры ртутной лампы, зарегистрированные без фильтра порядков и с ним. Как видно из рисунка, использование фильтра позволяет отсекаать «паразитные» линии

нерабочих порядков. Также эффективность работы фильтра демонстрирует Рисунок 45, где показана линия ртути 253,65 нм, зарегистрированная при экспозиции 10 мс в первом рабочем порядке (45а) и при экспозиции 1 с во втором нерабочем 45б. Как видно из рисунков, интенсивность линии во втором порядке с учётом разницы в экспозиции меньше в 2×10^4 и более раз.

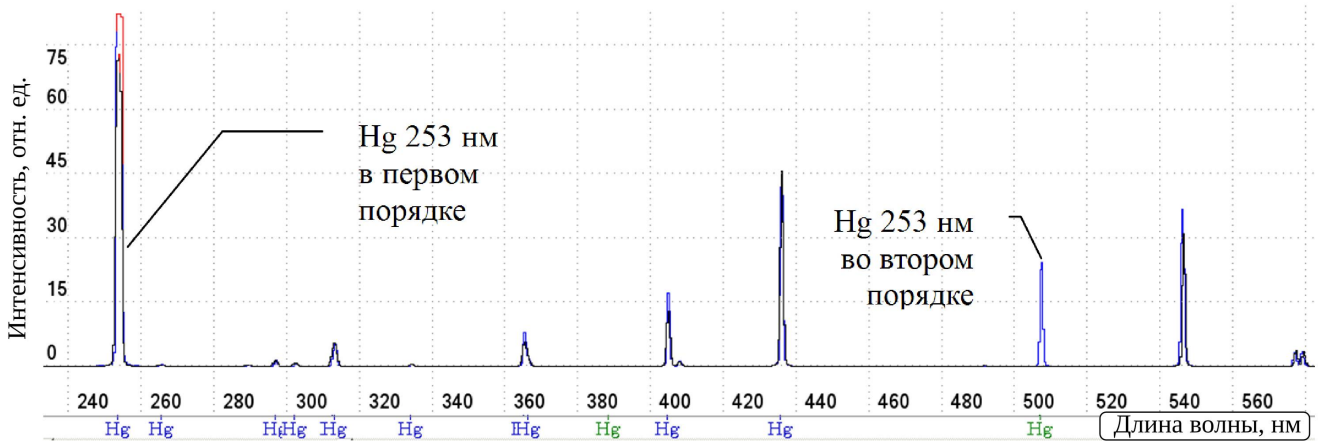


Рисунок 44 – Обзорные спектры ртутной лампы, зарегистрированные без использования (синий) и с использованием (чёрный) фильтра порядков

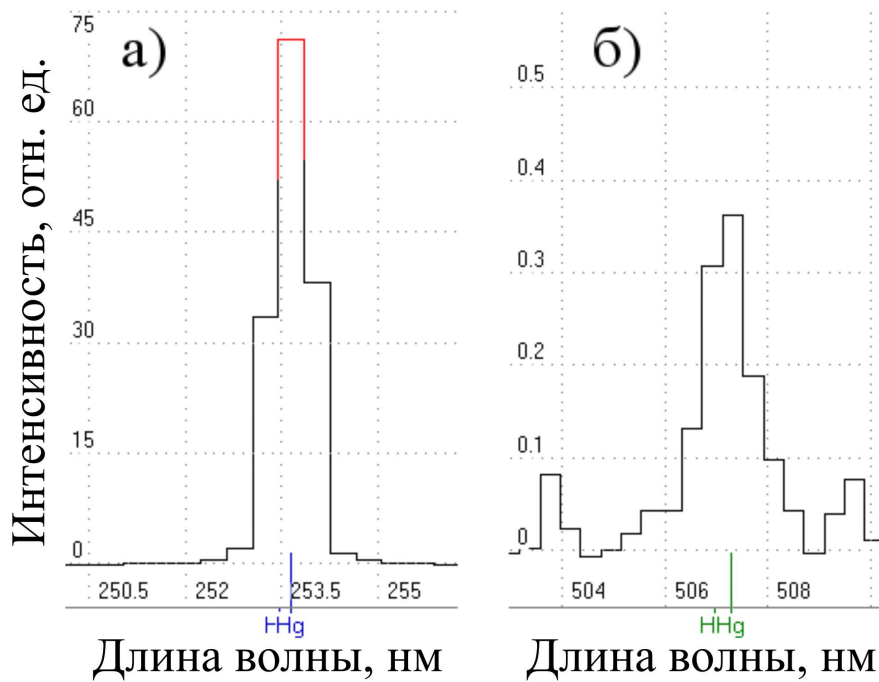


Рисунок 45 –Спектральная линия ртути 253,65 нм, зарегистрированная спектрометром «Колибри-2»: а – первый порядок спектра; б – второй порядок спектра

4.4 Сравнение системы контроля с существующими решениями

В Российской Федерации разработка систем широкополосного контроля практически не ведётся, а зарубежные производители вакуумных установок из Германии, США, Японии, Китае, Беларуси и других стран активно разрабатывают и внедряют системы широкополосного спектрального контроля. Чтобы полноценно оценить характеристики разработанной системы контроля было проведено сравнение её с лучшими решениями, предлагаемыми известными мировыми производителями. При это для сравнения брались лучшие решения систем контроля для работы в схожем диапазоне длин волн (иногда в составе вакуумных установок). При наличии нескольких решений бралось самое технически совершенное (с точки зрения данного сравнения), а также то, которое предлагается производителем в качестве наилучшего или рекомендуемого. Так, для сравнения были использованы следующие системы (для каждой приведены источники информации):

- система монохроматического контроля «OMS 5100» (Optical Monitoring System) в составе вакуумной установки «SYRUSpro» и система широкополосного контроля «BBM» (Broad Band Monitoring) в составе вакуумной установки «HELIOS» от производителя Bühler Leybold Optics (Германия) [33; 34];
- системы оптического контроля «Spectrum-Pro» в двух исполнениях — монохроматическом и широкополосном от производителя Dynavac (США) [35; 36; 84];
- система оптического мониторинга «SL-2012A SpectraLock» от производителя Eddy Co. (США) [37; 38];
- система широкополосного контроля «OTFC-1800» в составе установки «НОМ2-R-VIS350А» от производителя OptoRun Co. Ltd. (Япония) [39];

- система контроля «IRIS 0411» со спектрометром «EOS45» от производителя ЭссентОптикс (Беларусь) [40];
- комплекс оптического контроля «OCP Broadband» (Optical Coating Provider) и система монохроматического контроля «Invisio M» производителя Izovac (Беларусь) [41; 42; 43; 85; 86].

В качестве характеристик для сравнения рассматривались не все возможные характеристики систем контроля, а лишь те, которые особенно важны при измерении толщин слоёв методом непрямого широкополосного контроля с возможностью решения обратных задач многослойных покрытий в реальном времени, а именно:

1. спектральный диапазон контроля;
2. метод контроля: широкополосный или монохроматический;
3. метод контроля: прямой или не прямой;
4. возможность расчёта толщины нанесённого слоя;
5. измеряемая характеристика: спектры пропускания (T) или отражения (R); на основании выводов главы 1 поддержка работы по спектрам отражения для непрямого контроля рассматривается как преимущество;
6. количество фотодетекторов в линейке (что соответствует количеству точек в спектре в случае широкополосного контроля);
7. возможность регистрировать спектры в реальном времени (хотя бы один спектр в секунду);
8. критерий остановки нанесения слоя: по визуальному или автоматическому сравнению спектров или по измеренной толщине слоя, что возможно при решении обратной задачи многослойных покрытий.

Характеристики систем контроля брались из официальных спецификаций на сайте производителя (при наличии) или информационных буклетов и публикаций. Информация о случайных и систематических погрешностях измерения толщин слоёв почти ни у кого из производителей не представлена, в связи с чем не было возможности провести сравнение по данным характеристикам. Вероятно, это

обусловлено тем что случайные и систематические погрешности зависят не только от системы контроля, но и от выбора наносимых материалов, контрольных подложек, погрешности задания их показателей преломления и других факторов.

Результат сравнения представлен в Таблице 4, где зелёным фоном с жирным шрифтом отмечены достоинства одних систем относительно других, красным отмечены недостатки, жёлтым – слабости. Несколько ячеек остались не заполнены из-за того, что не удалось найти соответствующую информацию. В нескольких ячейках добавлен символ «(?)», означающий, что приведено предполагаемое значение, поскольку информация о продукции не указана производителем однозначно.

Сравнение не включает все возможные характеристики систем контроля, не является абсолютно полным и объективным, и среди рассмотренных решений многие могут обладать рядом характеристик, которые превосходят характеристики разработанной системы, однако в рамках данной диссертации, посвящённой исследованию метода непрямого оптического контроля толщин многослойных покрытий в широком спектральном диапазоне, приоритет был отдан характеристикам, рассмотренным ранее. Именно с упором на совершенствование данных характеристик осуществлялась работка и создание системы.

На основании данного сравнения систем контроля можно сделать вывод, что 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** все рассмотренные решения от известных мировых производителей систем контроля и вакуумных установок.

Таблица 4 – Сравнение характеристик разработанной системы контроля с лучшими решениями, предлагаемыми известными мировыми производителями

Производитель	Разработанная система + ВУ-2М	Bühler Leybold Optics		OptoRun Co. Ltd.
		OMS 5100 + SYRUSpro	BBM + HELIOS	НОМ2-R-VIS350A + 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	R	R или T	T	R или T
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.
		Spectrum-Pro	Spectrum-Pro	SL-2012A 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	R	R или T	R или T	R
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	
		IRIS 0411 (на базе EOS 45)	Invisio M	OCP 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	R	R или T	R или T	R или T
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

Выводы к главе 4

Разработана система спектрального контроля толщин слоёв в широком спектральном диапазоне 525 – 990 нм на основе малогабаритного спектрометра «Колибри-2» [108; 109]. Система работает по спектрам отражения и поддерживает два метода контроля – прямой и непрямой по дополнительным контрольным подложкам («подложкам-свидетелям»). Использование более универсального непрямого метода контроля позволяет наносить покрытия с одинаковой точностью вне зависимости от оптической задачи, которую решает создаваемое покрытие.

Для управления системой контроля разработано специализированное программное обеспечение «LayerControl», которое поддерживает такие функции, как импорт конфигурации покрытия из программного обеспечения «OptiLayer», автоматическое разбиение дизайна покрытия в случае применения метода непрямого контроля, калибровку системы, измерение и визуализацию расчётного и экспериментального коэффициентов отражения (или пропускания) в реальном времени, ручное изменение дизайна покрытия, сигнализацию оператору о завершении слоя, расчёт текущей толщины наносимого слоя и скорости его нанесения.

Разработанное 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.

Разработанная система контроля введена в состав вакуумной установки «ВУ-2М» в Институте лазерной физики (ИЛФ СО РАН), г. Новосибирск. 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.

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, было получено просветляющее покрытие для диапазона 400 – 670 нм с характеристиками, не уступающими мировому уровню серийных промышленных и лабораторных решений – максимальное отражение во всём диапазоне 0,15 %, интегральное среднее отражение 0,08 %. 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. Применение данных высокоэффективных просветляющих покрытий Новосибирским приборостроительным заводом позволило им повысить

коэффициент светопропускания прицела (изделие ПО525) в этом спектральном диапазоне до 91,5 %, что соответствует по данному параметру лучшим зарубежным аналогам.

Кроме того, с использованием системы контроля 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.

Для решения проблемы нерабочих порядков дифракционного спектра в спектрометре «Колибри-2» выполнен расчёт геометрической и спектральной конфигураций многослойных диэлектрических фильтров. В соответствии с ним созданы фильтры порядков дифракционного спектра со подавлением излучения нерабочих порядков более чем в 2×10^4 раз, что является абсолютно достаточным для данного спектрометра, поскольку его динамический диапазон составляет 10^4 .

Чтобы полноценно оценить характеристики разработанной системы контроля было проведено сравнение её с лучшими решениями, предлагаемыми известными мировыми производителями. При этом для сравнения брались лучшие решения систем контроля для работы в схожем диапазоне длин волн, а в качестве характеристик для сравнения рассматривались те, которые особенно важны при измерении толщин слоёв методом непрямого широкополосного контроля с возможностью решения обратных задач многослойных покрытий в реальном времени. На основании данного сравнения систем контроля сделан вывод, что 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 все рассмотренные решения от известных мировых производителей систем контроля и вакуумных установок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая диссертация посвящена исследованию метода непрямого широкополосного контроля нанесения многослойных покрытий с использованием численного решения в реальном времени обратных задач для снижения погрешностей измерения толщин наносимых слоёв и созданию опытного образца системы контроля на его основе.

При решении поставленных задач получены следующие новые научно-технические результаты:

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 непрямой 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bunshah, R. F. *Deposition Technologies for Films and Coatings – Developments and Applications* / Rointan Framroze Bunshah // Noyes Publications, New Jersey. – 1982.
2. Jacobi, K. of Book: *Handbook of Thin Film Process Technology* / Karl Jacobi. – Institute of Physics Publishing, 2001.
3. Martinu, L. *Plasma Deposition of Optical Films and Coatings: A Review* / Ludvik Martinu, Daniel Poitras // *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films* 18.6. – 2000. – pp. 2619-2645.
4. Martin, P. J. *Review of the Filtered Arc Process and Materials Deposition* / P. J. Martin, A. Bendavid // *Invited Review in Thin Solid Films* 394.1-2. – 2001. – pp. 1-14.
5. Lalezari, R. *Ion Beam Sputter Deposition of Optical Interference Coatings* / R. Lalezari // *Proc. Aust. Opt. Soc. Meeting, Adelaide Australia.* – 2000.
6. Martin, P. J. *Optical Films produced by Ion-Based Techniques* / P. J. Martin, R. P. Netterfield // *Progress in Optics* Vol. XXIII. – 1993. – pp. 113-113.
7. Flory, F. R., *Thin Films for Optical Systems* / François R. Flory. – Marcel Dekker, New York, 1995.
8. Macleod, H. A. *Monitoring of optical coatings* / H. A. Macleod // *Applied optics* 20, no. 1. – 1981. – pp. 82-89.
9. Macleod, H. A. *Layer uniformity and thickness monitoring* / H. A. Macleod. – *Thin-Film Optical Filters*, 3rd ed., Chap. 11. – pp. 488-520.
10. Tikhonravov, A. V. *On the accuracy of optical thin film parameter determination based on spectrophotometric data* / Alexander V. Tikhonravov, Michael K. Trubetskov, Gary W. DeBell // *In Advanced Characterization Techniques for Optics, Semiconductors, and Nanotechnologies*, vol. 5188. – 2003. – pp. 190–200.
11. Vidal, B. *Optical monitoring of nonquarterwave multilayer filters* / B. Vidal, A. Fornier, E. Pelletier // *Applied optics* 17, no. 7. – 1978. – pp. 1038-1047.

12. Trubetskov, M. Automated construction of monochromatic monitoring strategies / M. Trubetskov, T. Amotchkina, A. Tikhonravov // *Applied optics* 54, no. 8. – 2015. – pp. 1900-1909.
13. Zhang, C. Single-wavelength monitoring method for optical thin-film coating / Cheng Zhang, Yongtian Wang, Weiqiang Lu // *Optical Engineering* 43, no. 6. – 2004. – pp. 1439-1445.
14. Van Milligen, F. Development of an automated scanning monochromator for monitoring thin films / Fred J. Van Milligen, Bertrand Bovard, Michael R. Jacobson, James Mueller, Ross Potoff, Richard L. Shoemaker, H. Angus Macleod // *Applied optics* 24, no. 12. – 1985. – pp. 799-1802.
15. Zhao, F. Monitoring of periodic multilayers by the level method / Futing Zhao // *Applied optics* 24, no. 20. – 1985. – pp. 3339-3342.
16. Zhu, Z. Monitoring the arbitrary thickness of optical thin films and their error simulation: a method / Zhen Zhu, Wensheng Li, Yuansen Hua // *Applied optics* 24, no. 11. – 1985. – pp. 1693-1695.
17. Lai, F. Dual wavelengths monitoring for optical coatings / Fachun Lai, Xiaochun Wu, Binping Zhuang, Qu Yan, Zhigao Huang // *Optics express* 16, no. 13. – 2008. – pp. 9436-9442.
18. Vidal, B. Wideband optical monitoring of nonquarterwave multilayer filters / B. Vidal, A. Fornier, E. Pelletier // *Applied optics* 18, no. 22. – 1979. – pp. 3851-3856.
19. Wilbrandt, S. In-situ broadband monitoring and characterization of optical coatings / Steffen Wilbrandt, Robert Leitel, Dieter Gäbler, Olaf Stenzel, Norbert Kaiser // *Optical Interference Coatings*, Optical Society of America. – 2004. – p. TuE6,
20. Lappschies, M. Application of optical broadband monitoring to quasi-rugate filters by ion-beam sputtering / Marc Lappschies, Björn Görtz, Detlev Ristau // *Applied optics* 45, no. 7. – 2006. – pp. 1502-1506.
21. Badoil, B. Interest of broadband optical monitoring for thin-film filter manufacturing / Bruno Badoil, Fabien Lemarchand, Michel Cathelinaud, Michel Lequime // *Applied optics* 46, no. 20. – 2007. – pp. 4294-4303.

22. Vidal, B. Nonquarterwave multilayer filters: optical monitoring with a minicomputer allowing correction of thickness errors / B. Vidal, E. Pelletier // *Applied optics* 18, no. 22. – 1979. – pp. 3857-3862.
23. Hu, X.-Q. Apparatus for wideband monitoring of optical coatings and its uses / Xue-Qun Hu, Yu-Ming Chen, Jin-Fa Tang // *Applied optics* 28, no. 14. – 1989. – pp. 2886-2888.
24. Emiliani, G. Fast scan spectrometer for monitoring of thin film optical properties / Gabriele Emiliani, A. Piegari, Enrico Masetti // *In-Process Optical Measurements*, vol. 1012, International Society for Optics and Photonics. – 1989. – pp. 35-39.
25. Bauer, H. In situ optical multichannel spectrometer system / Harry H Bauer, Erwin Nuessler // *Optical Interference Coatings*, vol. 2253, International Society for Optics and Photonics. – 1994. – pp. 423-432.
26. Tilsch, M. Direct optical monitoring instrument with a double detection system for the control of multilayer systems from the visible to the near infrared / Markus Tilsch, Volker Scheuer, Josef Staub, Theo T. Tschudi // *Optical Interference Coatings*, vol. 2253, International Society for Optics and Photonics. – 1994. – pp. 414-423.
27. Ristau, D. Optical broadband monitoring of conventional and ion processes / Detlev Ristau, Henrik Ehlers, Tobias Gross, Marc Lappschies // *Applied optics* 45, no. 7. – 2006. – pp. 1495-1501.
28. Badoil, B. An error compensation strategy for broadband optical monitoring / Bruno Badoil, Fabien Lemarchand, Michel Cathelinaud, Michel Lequime // *Optical Interference Coatings*, Optical Society of America. – 2007. – p. WC5.
29. Grèzes-Besset, C. Multi-Wavelength Optical Monitoring for Infrared Complex Functions: Application to Process Improvement / Grèzes-Besset, Catherine, Nathalie Valette, Hélène Krol, Didier Torricini, Frédéric Chazallet, Julie Poupard, Laurent Gallais, Jean-Yves Natoli, Mireille Commandré // *Optical Interference Coatings*, Optical Society of America. – 2007. – p. WC9.
30. Wilbrandt, S. In-situ broadband monitoring of heterogeneous optical coatings / Steffen Wilbrandt, Norbert Kaiser, Olaf Stenzel // *Thin Solid Films* 502, no. 1-2. – 2006. – pp. 153-157.

31. Wilbrandt, S. On-line Re-engineering of Interference Coatings / Steffen Wilbrandt, Olaf Stenzel, Norbert Kaiser, Michael K. Trubetskov, Alexander V. Tikhonravov // Optical Interference Coatings, Optical Society of America. – 2007. – p. WC10.
32. Rabady, R. High-resolution photometric optical monitoring for thin-film deposition / Rabi Rabady, Kirill Zinoviev, Ivan Avrutsky // Applied optics 43, no. 1. – 2004. – pp. 143-148.
33. Optical monitoring systems на сайте Buhler Group (pdf) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.buhlergroup.com/global/en/products/syruspro-series/optical-monitoring-systems.htm>
34. Precision Optics - Брошюра решений от производителя Buhler Leybold Optics (pdf) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.buhlergroup.com/global/en/downloads/Brochure_Precision_Optics_Buhler_Leybold_Optics_EN.pdf
35. Система оптического контроля "Spectrum-Pro" на сайте производителя Dynavac [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.dynavac.com/systems/thin-film-systems/precision-optical-coating-systems/spectrum-pro-optical-monitoring-system/>
36. Спецификации системы контроля "Spectrum-Pro" (широкополосный оптический контроль) производителя Dynavac (pdf) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.dynavac.com/wp-content/uploads/2015/07/Dynavac-Spectrum-Pro-Broadband-Data-Sheet.pdf>
37. Встраиваемая система оптического мониторинга "SL-2012A SpectraLock" (IDEM Optical Monitor and Deposition Rate Controller) производителя Eddy Co. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.eddyco.com/SL-2012A.html>
38. Rodgers, W. In-Situ Optical Monitoring and Rate Control of Thin-Film Deposition Using Index Dispersion Enhanced Monitoring (IDEM) / Wayne E. Rodgers, Lawrence S. Ring (Eddy Co.) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://eddyco.com/Resources/Eddy_Co_IDEM_Paper.pdf

39. Спецификации системы контроля "OTFC-1800" производителя Optorun [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.optorun.co.jp/en/products/optical_thin_film_coater/otfc_1800.html
40. Брошюра производителя ЭссентОптикс - Встраиваемые в вакуумные установки системы контроля оптических характеристик покрытий на базе спектрометра и монохроматора [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.essentoptics.com/f/file/ЭссентОптикс_Оптические_системы_контроля-ред_06_2018.pdf
41. Оптические системы контроля на сайте производителя Izovac [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.izovac.com/components/optical_control_systems/
42. Система автоматического оптического контроля OCP Broadband на сайте производителя Izovac [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.izovac.com/components/optical_control_systems/ocp_broadband/
43. Листовка Автоматический оптический контроль от производителя Izovac (pdf) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.izovac.com/uploads/userfiles/files/listovka_opticheskij_kontrol_ocp_broadband.pdf
44. Tikhonravov, A. V. Modern state of the art in design and monitoring of optical coatings / 52nd Annual Technical Conference, Society of Vacuum Coaters, Santa Clara, CA, USA. – 2009. – pp. 7-11.
45. Badoil, B. Manufacturing of an absorbing filter controlled by a broadband optical monitoring / Bruno Badoil, Fabien Lemarchand, Michel Cathelinaud, Michel Lequime // Optics Express 16, no. 16. – 2008. – pp. 12008-12017.
46. Тихонравов, А. В. О методе синтеза оптических покрытий, использующим необходимые условия оптимальности / Александр Владимирович Тихонравов. – Журнал «Вестник Московского университета». Серия 3: Физика, астрономия, том 23, № 6, М. – 1982. – С. 91-93.
47. Tikhonravov, A. V. Application of the needle optimization technique to the design of optical coatings / Alexander V. Tikhonravov, Michael K. Trubetskov, Gary W. DeBell // Applied optics 35, no. 28. – 1996. – pp. 5493-5508.

48. Sullivan, B. T. Implementation of a numerical needle method for thin-film design / Brian T. Sullivan, J. A. Dobrowolski // *Applied optics* 35, no. 28. – 1996. – pp. 5484-5492.
49. Tikhonravov, A. V. Application of the needle optimization technique to the design of X-ray mirrors / Alexander V. Tikhonravov, Michael K. Trubetskov, Vladimir V. Protopopov, Andrei V. Voronov // *In Advances in Optical Interference Coatings*, vol. 3738, International Society for Optics and Photonics. – 1999. – pp. 248-255.
50. Verly, P. G. Modified needle method with simultaneous thickness and refractive-index refinement for the synthesis of inhomogeneous and multilayer optical thin films / Pierre G. Verly // *Applied optics* 40, no. 31. – 2001. – pp. 5718-5725.
51. Программный пакет «OptiLayer thin film software» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.optilayer.com/>
52. Zhupanov, V. G. Indirect broadband optical monitoring with multiple witness substrates / Valery G. Zhupanov, Evgeny V. Klyuev, Sergey V. Alekseev, Ivan V. Kozlov, Michael K. Trubetskov, Michael A. Kokarev, Alexander V. Tikhonravov // *Applied optics* 48, no. 12. – 2009. – pp. 2315-2320.
53. Tikhonravov, A.V. Investigation of the effect of accumulation of thickness errors in optical coating production by broadband optical monitoring / Alexander V. Tikhonravov, Michael K. Trubetskov, Tatiana V. Amotchkina // *Applied optics* 45, no. 27. – 2006. – pp. 7026-7034.
54. Кварцевый измеритель толщины пленок «Микрон-7» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://izovac.com/uploads/userfiles/files/micron_7.pdf
55. Reid, I. M. The ion plating of optical thin films for the infrared / I. M. Reid, H. A. Macleod, M. J. Carter, E. Henderson // *IPAT 79. Proceedings of the international conference on ion plating and allied techniques*. – 1979. – pp. 55–62.
56. Banning, M. Practical methods of making and using multilayer filters / Mary Banning // *Journal of the Optical Society of America* 37, no. 10. – 1947. – pp. 792-797.
57. Polster, H. D. A symmetrical all-dielectric interference filter / Harry D. Polster // *Journal of the Optical Society of America* 42, no. 1. – 1952. – pp. 21-24.

58. Behrndt, K. H. Physics of thin films. vol. 3 / Klaus H. Behrndt // G. Haas, Academic, New York. – 1966. – pp. 1-59.
59. Малышева, И.А. Технология производства интегральных микросхем / Идея Александровна Малышева. – Радио и связь, Москва, 1991. – С. 169-173.
60. Van der Laan, C. J. Monitoring of optical thin films using a quartz crystal monitor / C. J. van der Laan, H. J. Frankena // Vacuum 27, no. 4. – 1977. – pp. 391-397.
61. Tikhonravov, A. V. Automated design and sensitivity analysis of wavelength-division multiplexing filters / Alexander V. Tikhonravov, Michael K. Trubetskov. // Applied optics 41, no. 16. – 2002. – pp. 3176-3182.
62. Wilbrandt, S. In situ optical characterization and reengineering of interference coatings / Steffen Wilbrandt, Olaf Stenzel, Norbert Kaiser, Michael K. Trubetskov, Alexander V. Tikhonravov // Applied optics 47, no. 13. – 2008. – pp. C49-C54.
63. Основы оптики / Макс Борн, Эмиль Вольф. – М., 1973.
64. Furman, Sh. A. Basics of optics of multilayer systems / Sh. A. Furman, A. V. Tikhonravov. – Atlantica Séguier Frontieres, 1992. – p. 242.
65. Tikhonravov, A.V. Computational manufacturing as a bridge between design and production / Alexander V. Tikhonravov, Michael K. Trubetskov // Applied optics 44, no. 32. – 2005. – pp. 6877-6884.
66. Tikhonravov, A. V. Statistical approach to choosing a strategy of monochromatic monitoring of optical coating production / A.V. Tikhonravov, M.K. Trubetskov, T.V. Amotchkina // Applied optics 45, no. 30. – 2006. – pp. 7863-7870.
67. Tikhonravov, A. V. Elimination of cumulative effect of thickness errors in monochromatic monitoring of optical coating production: theory / A. V. Tikhonravov, M. K. Trubetskov // Applied optics 46, no. 11. – 2007. – pp. 2084-2090.
68. Tikhonravov, A. V. Computational experiments on optical coating production using monochromatic monitoring strategy aimed at eliminating a cumulative effect of thickness errors / Alexander V. Tikhonravov, Michael K. Trubetskov, Tatiana V. Amotchkina // Applied optics 46, no. 28. – 2007. – pp. 6936-6944.
69. Li, L. Wideband monitoring and measuring system for optical coatings / Li Li, Yihsun Yen // Applied optics 28, no. 14. – 1989. – pp. 2889-2894.

70. Sullivan, B. T. Deposition error compensation for optical multilayer coatings. I. Theoretical description / Brian T. Sullivan, J. A. Dobrowolski // *Applied optics* 31, no. 19. – 1992. – pp. 3821-3835.
71. Sullivan, B. T. Deposition error compensation for optical multilayer coatings. II. Experimental results – sputtering system / Brian T. Sullivan, J. A. Dobrowolski // *Applied optics* 32, no. 13. – 1993. – pp. 2351-2360.
72. Sullivan, B. T. High-rate automated deposition system for the manufacture of complex multilayer coatings / Brian T. Sullivan, Glenn A. Clarke, Takayuki Akiyama, Norman Osborne, Martial Ranger, J. A. Dobrowolski, Louisa Howe, Akira Matsumoto, Yizhou Song, Kazuo Kikuchi // *Applied optics* 39, no. 1. – 2000. – pp. 157-167.
73. Зарубин, И. А. Применение малогабаритного спектрометра «Колибри-2» в атомно-эмиссионном анализе / И. А. Зарубин, В. Г. Гаранин, В. А. Лабусов. Заводская лаборатория. Диагностика материалов Т. 78, № 1-2. – 2012. – С. 86-89.
74. Ritter, E. Properties of optical film materials / Elmar Ritter // *Applied optics* 20, no. 1. – 1981. – pp. 21-25.
75. Ершов, А. В. Многослойные оптические покрытия. Проектирование, материалы, особенности технологии получения методом электроннолучевого испарения / А. В. Ершов, А. И. Машин. – ННГУ, Нижний Новгород, 2006.
76. Amotchkina, T. V. Structural properties of antireflection coatings / Tatiana V. Amotchkina, Alexander V. Tikhonravov, Michael K. Trubetskov, Sergey A. Yanshin // *Optical Interference Coatings*, Optical Society of America. – 2007. – p. WB5.
77. Macleod, H. A. Turning value monitoring of narrow-band all-dielectric thin-film optical filters / H. Angus Macleod // *Optica Acta: International Journal of Optics* 19, no. 1. – 1972. – pp. 1-28.
78. Macleod, H. A. *Thin Film Optical Filters*, 3rd ed. / H. Angus Macleod // CRC Press, 2001.

79. Bobbs, B. Optical monitoring of nonquarterwave film thicknesses using a turning point method / Bradley Bobbs, J. Earl Rudisill // *Applied optics* 26, no. 15. – 1987. – pp. 3136-3139.
80. Tikhonravov, A. Automated monitoring of WDM filters / Alexander Tikhonravov, M. K. Trubetskov, A. V. Voronov // *Optical Interference Coatings*, Optical Society of America. – 2001. – p. WA3.
81. Tikhonravov, A.V. Correlated Choice of Design and Monitoring Strategy / A.V. Tikhonravov, M.K. Trubetskov, I. Kozlov, S. Alekseev, P. Konotopov, V. Zhupanov // *Optical Interference Coatings*, Optical Society of America. – 2013. – p. WB-3.
82. Lee, C.-C. In situ sensitive optical monitoring with proper error compensation / Cheng-Chung Lee, Kai Wu // *Optics letters* 32, no. 15. – 2007. – pp. 2118-2120.
83. Lee, C.-C. Improvement of the optical coating process by cutting layers with sensitive monitor wavelengths / Cheng-Chung Lee, Kai Wu, Chien-Cheng Kuo, Sheng-Hui Chen // *Optics express* 13, no. 13. – 2005. – pp. 4854-4861.
84. Система контроля "Spectrum-Pro" (оптический) производителя Dynavac (pdf) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.dynavac.com/wp-content/uploads/2015/07/Dynavac-Spectrum-Pro-Optical-Monitoring-System.pdf>
85. Система контроля "Invisio M" на сайте производителя Izovac [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.izovac.com/en/components/optical_control_systems/invisio_m/
86. Спецификации системы контроля "Invisio M" производителя Izovac (pdf) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.izovac.com/uploads/userfiles/files/invisio_m_eng_2012.pdf
87. Tikhonravov, A. V. Investigation of the error self-compensation effect associated with broadband optical monitoring / Alexander V. Tikhonravov, Michael K. Trubetskov, Tatiana V. Amotchkina // *Applied optics* 50, no. 9. – 2011. – pp. C111-C116.
88. Tikhonravov, A. V. Does broadband optical monitoring provide an error self-compensation mechanism? / Alexander V. Tikhonravov, Michael K. Trubetskov, Tatiana V. Amotchkina // *Optical Interference Coatings*, Optical Society of America. – 2010. – p. TuC3.

89. Tikhonravov, A. Monitoring Strategy Combining the Advantages of Direct and Indirect Optical Monitoring / Alexander V. Tikhonravov, Michael K. Trubetskov // Optical Interference Coatings, Optical Society of America. – 2007. – p. WC2.
90. Tikhonravov, A. Influence of systematic errors in spectral photometric measurements on the determination of optical thin film parameters / Alexander Tikhonravov, M. K. Trubetskov, M. A. Kokarev, T. V. Amotchkina, A. Duparre // Optical Interference Coatings, Optical Society of America. – 2001. – p. TuD2.
91. Тихонравов, А.В. Компьютерное моделирование как средство разработки алгоритмов управления процессом напыления покрытий / А.В. Тихонравов, М.К. Трубецков, М.А. Кокарев, И.В. Козлов // Сб. трудов VII Международной конференции «Прикладная оптика», Т. 3, тезисы. Компьютерные технологии в оптике, Санкт-Петербург. – 2006. – С. 237-241.
92. Розенберг, Г. В. Многолучевая интерферометрия и интерференционные светофильтры: монография / Г. В. Розенберг, 1952
93. Trubetskov, M. Broadband monitoring simulation with massively parallel processors / Mikhail Trubetskov, Tatiana Amotchkina, Alexander Tikhonravov // Advances in Optical Thin Films IV, vol. 8168, International Society for Optics and Photonics. – 2011. – p. 81681D.
94. Baumeister, P. Design of multilayer filters by successive approximations / Philip Baumeister // Journal of the Optical Society of America 48, no. 12. – 1958. – pp. 955-958.
95. Dobrowolski, J. A. Numerical methods for optical thin films / J. A. Dobrowolski // Optics and Photonics News 8, no. 6. – 1997. – p. 24.
96. Dobrowolski, J. A. The impact of computers on the design and manufacture of optical multilayer coatings during the past 50 years / J. A. Dobrowolski // Proceedings of the annual technical conference-society of vacuum coaters, vol. 50. – 2007. – p. 289.
97. Kruschwitz, J. Software tools speed optical thin-film design / Jennifer Kruschwitz // Laser Focus World 39, no. 6. – 2003. – pp. 157-166.

98. Larouche, S. OpenFilters: open-source software for the design, optimization, and synthesis of optical filters / Stéphane Larouche, Ludvik Martinu // *Applied optics* 47, no. 13. – 2008. – pp. C219-C230.
99. Dobrowolski, J. A. Completely automatic synthesis of optical thin film systems / J. A. Dobrowolski // *Applied Optics* 4, no. 8. – 1965. – pp. 937-946.
100. Dobrowolski, J. A. Versatile computer program for absorbing optical thin film systems / J. A. Dobrowolski // *Applied optics* 20, no. 1. – 1981. – pp. 74-81.
101. Tikhonravov, A. V. Optical coating design approaches based on the needle optimization technique / A. V. Tikhonravov, M. K. Trubetskov, G. W. DeBell // *Applied optics* 46, no. 5. – 2007. – pp. 704-710.
102. Baumeister, P. W. Methods of altering the characteristics of a multilayer stack / Philip W. Baumeister // *Journal of the Optical Society of America* 52, no. 10. – 1962. – pp. 1149-1152.
103. Thoeni, W. P. Deposition of optical coatings: process control and automation / W. P. Thoeni // *Thin Solid Films* 88, no. 4. – 1982. – pp. 385-397.
104. Zorc, H. Optimum multilayer design selection in relation to production errors / H. Zorc // *Vacuum* 37, no. 1-2. – 1987. – pp. 101-102.
105. Пейсахсон, И.В. Оптика спектральных приборов // И.В. Пейсахсон, Изд. 2-е, доп. и перераб. – Л.: «Машиностроение», 1975. – С. 312.
106. Ocean Optics HL-2000-FHSA Specifications [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://oceanoptics.com/product/hl-2000-family/>
107. Семенов, З.В. Deposition Control Simulator: Программа моделирования работы системы контроля / Захар Владимирович Семенов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016612869 от 11.03.2016 г. – 2016.
108. 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.
109. 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.
110. Бабин, С.А. Оценка оптимальных параметров многоэлементных твердотельных детекторов для сцинтилляционного атомно-эмиссионного спектрального анализа / С.А. Бабин, В.А. Лабусов // Аналитика и контроль Т. 18, № 1. – 2014. – С. 40-49.
111. Панкратов, С.В. Автоматическая градуировка спектрометров с анализаторами МАЭС по длинам волн (профилирование) / С.В. Панкратов, В.А. Лабусов., О.А. Неклюдов, П.В. Ващенко // Заводская лаборатория. Диагностика материалов Т. 81, № 1-2. – 2015. – С. 128-134.
112. 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.
113. Scobey, M. A. Very high vacuum magnetron sputtering method and apparatus for precision optical coatings / Michael A. Scobey, L. Bryn Stanley // U.S. Patent 5656138, Issued Aug. 1997, Filed Nov. 1991.
114. Fulton, M. L. New Ion-Assisted Filtered Cathodic Arc Deposition (IFCAD) technology for producing advanced thin films on temperature-sensitive substrates / Michael L. Fulton // Solar Optical Materials XVI, Vol. 3789, International Society for Optics and Photonics. – 1999. – p. 29-37.
115. 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.
116. Rancourt, J. D. Optical Thin Films – Users Handbook / James D. Rancourt. – SPIE Press, Bellingham, 1996.
117. Willey, R. R. Practical Design and Production of Optical Thin Films / Ronald R. Willey. – CRC Press, 2002.
118. Netterfield, R. Review of thin film deposition techniques / Roger Netterfield // Optical Interference Coatings. Optical Society of America. – 2001. – p. MA2.

119. Зарубин, И. А. Возможности малогабаритного спектрометра «Колибри-2» в атомно-эмиссионном спектральном анализе / И. А. Зарубин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - 2017. – Т. 83, № 1-2. – 2017. – С. 114-117.
120. Семенов, З. В. Применение многослойных диэлектрических покрытий для подавления излучения нерабочих порядков спектра в спектрометрах с дифракционной решеткой / З. В. Семенов, В. А. Лабусов, И. А. Зарубин, Г. В. Эрг // Заводская лаборатория. Диагностика материалов 83, №. 1-2. – 2017. – С. 117-122.
121. Технические параметры малогабаритного многоканального спектрометра «Колибри-2» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.vmk.ru/product/spektrometry/kolibri-2_-_malogabaritnyy_mnogokanalnyy_spektrome.html
122. Семенов, З.В. LayerControl: Программа для контроля толщин слоёв многослойных покрытий / Захар Владимирович Семенов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015661646 от 02.11.2015 г. – 2015.
123. Семенов, З. В. Автоматизация атомно-эмиссионного спектрального анализа с использованием видеоконтроля / З. В. Семенов, О. А. Неклюдов, И. И. Строков, В. Г. Гаранин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов 78, № 1-2. – 2012. – С. 78-81.
124. Macleod, A. Future of optical coatings / Angus Macleod // Optical Interference Coatings, OSA Technical Digest Series, Optical Society of America. – 2004. – p. MA1.
125. Schulz, U. Wideband antireflection coatings by combining interference multilayers with structured top layers / Ulrike Schulz // Optics Express 17, no. 11. – 2009. – pp. 8704-8708.

ПРИЛОЖЕНИЕ А АКТЫ О ВНЕДРЕНИИ

УТВЕРЖДАЮ

Директор института

Чл.-корр. РАН А.В. Тайченачев



А К Т

о внедрении (использовании) результатов

кандидатской диссертационной работы

Семенова Захара Владимировича

Комиссия в составе:

председатель: с.н.с. ИЛФ СО РАН, к.ф.-м.н. С.М. Ватник.

члены комиссии: н.с. ИЛФ СО РАН, к.г.-м.н. С.И. Ковалев, руководитель группы 1.4 ИЛФ СО РАН Г.Н. Андросов.

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы **«Исследование метода непрямого оптического контроля толщин многослойных покрытий в широком спектральном диапазоне»**, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук,

использованы при нанесении многослойных оптических покрытий методом электронно-лучевого испарения в Институте лазерной физики СО РАН в виде действующей системы спектрального контроля нанесения многослойных диэлектрических покрытий на основе спектрометра «Колибри-2» и специализированного программного обеспечения (ПО) LayerControl, поддерживающего интеграцию с пакетом численного расчета OptiLayer/OptiReOpt. Система используется в составе модернизированной вакуумной установки ВУ-2М и поддерживает два метода контроля по спектрам отражения – прямой и непрямо́й по дополнительным контрольным подложкам.

На вакуумной установке ВУ-2М, оснащенной системой спектрального контроля, были изготовлены сотни многослойных оптических покрытий с использованием непрямого метода оптического контроля: зеркала, отрезающие спектральные фильтры, просветляющие покрытия в широком спектральном диапазоне и др., в том числе, покрытия для спектральных областей, не пересекающихся со спектральным диапазоном контроля. Так, например, были изготовлены плотные зеркала для инфракрасной области 2600–3400 нм. В таких случаях основным требованием является прозрачность в диапазоне контроля материалов, используемых в покрытии.

Ряд изготовленных покрытий содержал тонкий стартовый слой толщиной менее 100 нм, контроль которого осуществлялся с использованием дополнительных контрольных подложек с предварительно нанесённым слоем.

Использование указанной системы позволило снизить погрешность толщин наносимых слоёв, автоматизировать определение момента остановки нанесения слоя и повысить качество изготавливаемых многослойных оптических покрытий благодаря возможности измерения толщины наносимого слоя в реальном времени и контроля скорости нанесения материала.

Результаты внедрялись при выполнении НИР и ОКР по темам:

1. Проект программы Президиума РАН «Фундаментальные основы прорывных технологий двойного назначения» №51.
2. Проект программы Президиума РАН «Сверхсильные световые поля и их приложения» №6.
3. Грант РФФИ №16-52-00040 «Комплексное исследование спектрально-генерационных характеристик кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфраматов, активированных тулием и гольмием» 2016-2017 гг.

Председатель комиссии:

 Ватник С.М.

Члены комиссии:

 Ковалев С.И.

 Андросов Г.Н.



УТВЕРЖДАЮ

Технический директор
Ю.А. Трясов

«15» 08 2019 г.

А К Т

о внедрении (использовании) результатов
кандидатской диссертационной работы
Семенова Захара Владимировича

Комиссия в составе:

Комбарова М.С. зам. технического директора по инновационному развитию;

Никанорова Н.Ю, зам. технического директора по ОС и Т

составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Исследование метода непрямого оптического контроля толщин многослойных покрытий в широком спектральном диапазоне», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы при изготовлении многослойных широкополосных просветляющих покрытий оптических элементов прицела (изделие ПО525) с целью уменьшения интенсивности отражённого излучения в видимом диапазоне и повышения коэффициента светопропускания прибора.

Покрытия содержали тонкий стартовый слой толщиной менее 100 нм, контроль которого осуществлялся с использованием дополнительных контрольных подложек с предварительно нанесённым слоем.

Анализ образцов ведущих зарубежных производителей оптических приборов показывает, что высокий коэффициент светопропускания этих приборов достигается применением многослойных просветляющих покрытий поверхностей оптических деталей. Применение разработанной в Институте автоматики и электрометрии СО РАН (ИАиЭ СО РАН) системы прецизионного спектрального контроля нанесения многослойных диэлектрических покрытий со слоями нанометровых толщин позволяет получать широкополосные просветляющие покрытия с низким остаточным отражением в видимом диапазоне. По договору с ИАиЭ СО РАН были изготовлены просветляющие покрытия для комплекта оптических деталей изделия ПО525. Использование данных просветляющих покрытий позволило повысить светопропускание создаваемого прицела (изделие ПО525) до 91,5%, что соответствует по данному параметру лучшим зарубежным аналогам.

Результаты внедрялись при выполнении ОКР по разработке и освоению производства панкратических прицелов.

Зам. технического директора по инновациям

М.С. Комбаров

Зам. технического директора по ОС и Т

Н.Ю. Никаноров

ПРИЛОЖЕНИЕ Б ПАТЕНТ НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2527670

**СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИН НАНОМЕТРОВЫХ
СЛОЕВ МНОГОСЛОЙНОГО ПОКРЫТИЯ,
ПРОВОДИМОГО В ПРОЦЕССЕ ЕГО НАПЫЛЕНИЯ**

Патентообладатель(ли): *Лабусов Владимир Александрович (RU),
Эрг Геннадий Владимирович (RU), Семёнов Захар
Владимирович (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2012150284

Приоритет изобретения **10 января 2012 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре
изобретений Российской Федерации **10 июля 2014 г.**

Срок действия патента истекает **10 января 2032 г.**

Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий



**ПРИЛОЖЕНИЕ В СВИДЕТЕЛЬСТВА О
ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ
ПРОГРАММ ДЛЯ ЭВМ**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2015661646

**«LayerControl: Программа для контроля толщины слоёв
многослойных покрытий»**

Правообладатель: **ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ
ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ «ВМК-ОПТОЭЛЕКТРОНИКА» (RU)**


Автор: **Семёнов Захар Владимирович (RU)**

Заявка № **2015618553**

Дата поступления **17 сентября 2015 г.**

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **02 ноября 2015 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 **Г.П. Илиев**



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2016612869

«Deposition Control Simulator: Программа моделирования
работы системы контроля»

Правообладатель: **ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ИНСТИТУТ
АВТОМАТИКИ И ЭЛЕКТРОМЕТРИИ СИБИРСКОГО
ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИАиЭ СО
РАН) (RU)**

Автор: *Семёнов Захар Владимирович (RU)*

Заявка № 2016610135

Дата поступления 11 января 2016 г.

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ 11 марта 2016 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Иалиев Г.П. Иалиев

