

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Исаев Тему́р Фу́ркатович

**Моделирование процессов напыления многослойных
покрытий с широкополосным оптическим контролем толщин
слоёв**

Специальность 1.2.2

Математическое моделирование, численные методы и комплексы
программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2026

Диссертация подготовлена на кафедре математики отделения прикладной математики физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель: *Лукьяненко Дмитрий Витальевич*
доктор физико-математических наук, доцент

Официальные оппоненты: *Сагателян Гайк Рафаэлович* — доктор технических наук, профессор, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), факультет радиоэлектроники и лазерной техники, кафедра технологий приборостроения, профессор.
Сулимов Владимир Борисович — доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Научно-исследовательский вычислительный центр Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, лаборатория вычислительных систем и прикладных технологий программирования, заведующий лабораторией.
Шишленин Максим Александрович — доктор физико-математических наук, Институт математики им. С. Л. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория прикладных обратных задач, главный научный сотрудник.

Защита диссертации состоится «12» мая 2026 года в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.012.1 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, ул. Ленинские горы, д. 1, строение 52, факультет ВМК, аудитория 685.

E-mail: ds@cs.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3898>

Автореферат разослан «__» _____ 20__ г.

Учёный секретарь
диссертационного совета МГУ.012.1,
доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН



А.В. Ильин

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Оптические покрытия являются одним из ключевых элементов практически всех современных оптических и оптико-электронных устройств. Они используются в производстве офтальмологических линз, линз для смартфонов и фотоаппаратов, дисплеев, защитных элементов денежных купюр и т.д. Прогресс во многих сложных технологических областях зависит от производства высококачественных оптических покрытий. Соответствующие области включают применение лазеров, медицинское приборостроение, космическую астрономию, приборы для лазерной литографии и т.п.

Оптические покрытия обычно получают путём напыления тонких диэлектрических и металлических слоёв на хорошо отполированные подложки. Толщина этих слоёв может варьироваться от нескольких нанометров (для применения в рентгеновских лучах) до нескольких сотен нанометров (для широкого спектра применений в видимой и ближней инфракрасной областях спектра). Количество слоёв оптического покрытия также варьируется в широком диапазоне. Простейшие защитные и высокоотражающие покрытия имеют один диэлектрический или металлический слой, в то время как покрытия WDM (wavelength-division multiplexing) для телекоммуникационных устройств с разделением по длине волны могут иметь сотни таких слоёв. Для наиболее сложных современных приложений, как правило, необходимы оптические покрытия, состоящие из нескольких десятков диэлектрических слоёв. Напыление покрытий происходит в специальных вакуумных камерах напыления. Чаще всего в процессе производства оптического покрытия используются только два материала с разными показателями преломления. В соответствии со значениями этих показателей используемые материалы относятся к материалам с высокими и низкими показателями преломления.

Анализ оптических покрытий основывается на исследовании спектральных характеристик покрытий. По мере распространения электромагнитной волны через многослойное оптическое покрытие на границах, разделяющих слои, возникает множество вторичных волн из-за отражений от этих границ и прохождения через них в другие слои. В результате интерференции этих вторичных волн образуется волна, отражённая от многослойного покрытия, и волна, прошедшая через покрытие. Эти электромагнитные волны зависят от длины волны падающего на многослойное покрытие излучения. Волны могут быть охарактеризованы коэффициентами пропускания и отражения оптического покрытия, которые являются спектральными характеристиками многослойного оптического покрытия.

Степень разработанности темы.

Требования к многослойным оптическим покрытиям формулируются как ограничения на их спектральные характеристики в заданной области спектра. Первая математическая задача, связанная с технологией напыления оптических покрытий, заключается в определении количества слоёв покрытия и их толщин, что позволяет этому покрытию соответствовать спектральным характеристикам,

близким к заданным целевым значениям. Данная задача называется задачей проектирования оптического покрытия, являющейся довольно специфической обратной задачей оптимизации, в которой пространство параметров оптимизации не фиксируется до начала поиска оптимальной конструкции покрытия (упорядоченного набора толщин слоёв покрытия, отвечающих целевым спектральным характеристикам).

В 1982 году для решения таких обратных задач проектирования был предложен эффективный метод оптимизации, называемый методом игольчатых вариаций. С тех пор этот метод получил дальнейшее развитие, и в настоящее время построение правильной теоретической конструкции оптического покрытия не является главной проблемой, как это было четыре десятилетия назад. Параллельно с развитием методов математического проектирования был достигнут огромный прогресс во внедрении новых процессов напыления и разработке новых вакуумных приборов для производства оптических покрытий. Тем самым дальнейший прогресс в технологии напыления оптических покрытий напрямую связан с реализацией надёжного контроля толщин слоёв во время создания многослойного оптического покрытия.

В процессе производства оптических покрытий применяются различные методы контроля толщин слоёв. В случае покрытий для видимой и инфракрасной области спектра широко используются методы оптического контроля. Среди множества методов оптического контроля особую роль играет метод *прямого широкополосного контроля*. Данный метод обладает низкой чувствительностью к шуму в измерениях спектральных характеристик покрытия.

Метод прямого широкополосного контроля основан на анализе широкополосных спектров пропускания или отражения оптического покрытия, который осуществляется непосредственно внутри камеры напыления. Так как скорость напыления типичных материалов для оптических покрытий находится в диапазоне 0.2-0.6 нм/сек, то в промежутках времени между последующими измерениями спектральных характеристик происходит напыление лишь небольшой доли слоёв покрытия. Измеренные спектры пропускания или отражения используются для прогнозирования момента, в который необходимо прекратить напыление слоя.

Существуют различные алгоритмы для прогнозирования момента завершения напыления слоя оптического покрытия. Один из возможных подходов к построению таких алгоритмов основан на вычислении функционала невязки, который состоит из квадрата разности между измеренным и теоретически предсказанным спектром в конце напыления слоя. В этом случае процесс напыления должен быть прекращён в тот момент, когда функционал невязки достигает своего минимального значения. В качестве альтернативы можно использовать уже измеренные спектры для решения однопараметрической обратной задачи определения толщины растущего слоя. Время окончания напыления слоя определяется путём сравнения полученного значения с теоретически запланированной толщиной в каждый момент измерения спектра напыляемого покрытия.

На первый взгляд, вышеприведённые подходы кажутся достаточно надёжными. Однако даже малые ошибки в ранее напылённых слоях значительно влияют

на измеренные спектры последующих напыляемых слоёв: происходит эффект кумулятивного накопления ошибок в толщинах слоёв всего оптического покрытия. Рост величин ошибок в толщинах слоёв приводит к увеличению расхождений между теоретически прогнозируемыми и фактическими спектральными характеристиками оптического покрытия. Этот рост становится особенно быстрым, когда количество напылённых слоёв превышает 15-20. В результате величина накопленных ошибок в толщинах слоёв становится настолько большой, что дальнейший контроль толщин слоёв покрытия перестаёт быть надёжным, в результате чего финальное оптическое покрытие оказывается неудовлетворительным.

Тем самым для борьбы с данным эффектом необходимо разрабатывать алгоритмы для определения времени окончания напыления слоя покрытия, которые учитывают ошибки, допущенные в процессе напыления предыдущих слоёв. Такой учёт можно реализовать путём определения фактической толщины уже напылённых слоёв оптического покрытия в автономном режиме, а затем полученные значения толщин использовать для корректировки параметров напыления, повторной калибровки устройств и улучшения процедуры контроля толщины отдельных слоёв.

Метод широкополосного оптического контроля позволяет внедрять такие алгоритмы в производственный процесс, предоставляя возможность переопределять толщины уже напылённых слоёв в процессе контроля толщины текущего слоя, нивелируя допущенные ранее ошибки в напылённых слоях. Тем самым наибольший интерес в развитии технологий напыления оптических покрытий вызывает разработка как алгоритмов прогнозирования момента остановки напыления слоя покрытия, так и алгоритмов для решения обратной задачи поиска толщин уже напылённых слоёв.

Описанный выше эффект кумулятивного накопления ошибок в толщинах слоёв напыляемого многослойного покрытия возникает вследствие корреляции этих ошибок в процессе широкополосного контроля. Несмотря на негативное влияние данного эффекта на производство многослойных оптических покрытий, корреляция ошибок, допущенных в напылённых слоях, может привести к положительному эффекту самокомпенсации этих ошибок в процессе напыления покрытия. Суть эффекта самокомпенсации заключается в специфическом распределении допущенных ошибок в толщинах напылённых слоёв, при наличии которых спектральные характеристики итогового многослойного покрытия полностью соответствуют целевым значениям, несмотря на достаточно большие значения этих ошибок. Например, производство WDM фильтров, которые имеют сотни слоёв, возможно только благодаря наличию эффекта самокомпенсации при использовании монохроматического контроля на центральной длине волны фильтра. А совсем недавно эффект самокомпенсации ошибок напыления был обнаружен при производстве многослойных поляризаторов лазерного излучения с широкополосным оптическим контролем. Следовательно, исследование эффекта самокомпенсации ошибок в толщинах напылённых слоёв многослойного покрытия является чрезвычайно важным, так как позволяет разработать методы для выбора оптимальной стратегии широкополосного оптического контроля, которая

будет обеспечивать наличие эффекта самокомпенсации в реальном производственном процессе для создания высококачественных многослойных покрытий.

Таким образом, разработка современных подходов, направленных на борьбу с эффектом кумулятивного накопления ошибок в толщинах слоёв напыляемых многослойных покрытий, а также исследование эффекта самокомпенсации этих ошибок позволяют существенно повысить качество широкополосного оптического контроля напыления многослойных покрытий.

Целью диссертационной работы является разработка подходов, направленных на повышение качества широкополосного оптического контроля напыления многослойных покрытий.

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

1. Разработать методы математического моделирования процесса напыления многослойных покрытий с широкополосным оптическим контролем толщин слоёв.
2. Разработать численные методы для определения времени окончания напыления слоя многослойного покрытия.
3. Разработать методы высокоэффективного математического моделирования ошибок толщин, получаемых в процессе напыления многослойных покрытий с широкополосным оптическим контролем толщин слоёв.
4. Исследовать корреляцию и эффект самокомпенсации ошибок в толщинах напылённых слоёв многослойных покрытий.
5. Разработать численные методы для решения обратной задачи поиска толщин напылённых слоёв по измеренным спектральным характеристикам оптического покрытия.
6. Реализовать все разработанные численные методы в виде комплекса программ.

Научная новизна:

1. Разработаны и представлены в виде комплекса программ оригинальные методы математического моделирования процессов напыления многослойных покрытий с широкополосным оптическим контролем, позволяющие тестировать и разрабатывать подходы, направленные на повышение качества контроля.
2. С помощью методов математического моделирования процесса напыления покрытий разработаны новые подходы для надёжного определения момента остановки напыления слоя.
3. С помощью математического моделирования проведено оригинальное исследование напыления первого слоя покрытия с использованием данных натурного эксперимента.
4. Разработан и представлен в виде комплекса программ оригинальный метод высокоэффективного математического моделирования ошибок толщин, получаемых в процессе напыления многослойных покрытий с широкополосным оптическим контролем толщин слоёв.

5. Впервые проведено исследование корреляции и эффекта самокомпенсации ошибок в толщинах напыляемых слоёв многослойных покрытий с использованием метода высокоэффективного математического моделирования ошибок напыления.
6. Предложены новые численные методы для решения обратной задачи определения толщин напылённых слоёв многослойных покрытий.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в том, что разработанные методы математического моделирования позволяют конструировать новые подходы, направленные на повышение качества широкополосного контроля, а также проводить вычислительные эксперименты, моделируя условия производственного процесса с использованием данных натуральных экспериментов. Описанные математические методы позволяют реализовывать моделирование процесса напыления покрытий с различными стратегиями широкополосного контроля и проводить исследование влияния ошибок, которые могут быть допущены в реальном производственном эксперименте, предоставляя возможность заранее выбирать наиболее оптимальную стратегию для создания высококачественного многослойного покрытия. Предложенные в диссертационной работе подходы для повышения качества широкополосного контроля и новые численные методы для решения обратной задачи определения толщин напылённых слоёв могут быть использованы в реальных производственных процессах напыления.

Методология и методы исследования. В работе использованы следующие теоретические методы исследования: методы математической физики, физической оптики, вычислительной математики, линейной алгебры, теории решения обратных и некорректно поставленных задач, методы оптимизации, методы минимизации, математической статистики и анализа данных, методы математического моделирования и прикладного программирования с использованием платформы для программирования MATLAB.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическое моделирование процессов напыления многослойных покрытий позволяет разрабатывать и тестировать вычислительные подходы, направленные на повышение качества широкополосного оптического контроля напыляемых многослойных покрытий.
2. Численные методы для прогнозирования момента остановки напыления слоёв многослойных оптических покрытий и численные методы для решения обратных задач определения толщин напылённых слоёв по измеренным спектральным характеристикам оптического покрытия позволяют повысить качество широкополосного оптического контроля напыляемых многослойных покрытий.
3. Комплекс проблемно-ориентированных программ, реализующий предложенные методы математического моделирования ошибок, получаемых в процессе напыления многослойных покрытий с широкополосным оптическим контролем толщин слоёв, позволяет эффективно проводить исследование корреляции и эффекта самокомпенсации ошибок

напыления для определения наиболее оптимальной стратегии широкополосного оптического контроля с целью создания высококачественных многослойных покрытий.

Выносимые на защиту положения соответствуют следующим пунктам паспорта специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ:

1. Положение 1 соответствует пункту 3 паспорта специальности («Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента»)
2. Положение 2 соответствует пункту 3 паспорта специальности («Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента») и пункту 8 паспорта специальности («Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента»).
3. Положение 3 соответствует пункту 2 паспорта специальности («Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий») и пункту 8 паспорта специальности («Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента»).

Апробация работы. Предложенные методы и описанные результаты диссертационного исследования были получены в рамках исполнения НИРов следующих проектов РФФИ:

- № 21-11-00011, «Нелокальные алгоритмы решения обратных задач распознавания в оптике слоистых покрытий» (01 апреля 2021 – 31 декабря 2023 гг.);
- № 16-11-10219П, «Разработка алгоритмов решения обратной задачи контроля процессов напыления оптических нанопокрывтий» (16 мая 2019 – 31 декабря 2020 гг.);
- № 19-11-00053, «Суперкомпьютерное моделирование свойств материалов тонких пленок для оптических и лазерных технологий» (23 апреля 2019 – 31 декабря 2021 гг.);
- № 14-11-00409, «Высокопроизводительные технологии моделирования релаксационных процессов в наноструктурированных тонких плёнках» (4 мая 2017 – 31 декабря 2018 гг.);
- № 16-11-10219, «Разработка алгоритмов решения обратной задачи контроля процессов напыления оптических нанопокрывтий» (1 января 2016 – 31 декабря 2018 гг.).

Также предложенные методы и описанные результаты диссертационного исследования прошли апробацию и обсуждение на следующих конференциях и научных семинарах:

- Международная научная конференция «Ломоносовские чтения» (19 апреля 2018 г.);
- Научный семинар в НИВЦ МГУ имени М. В. Ломоносова «Обратные задачи математической физики» под руководством профессора А. Б. Бакушинского, профессора А. В. Тихонравова и профессора А. Г. Яголы (30 октября 2024 г.);
- Заседание кафедры математики отделения прикладной математики физического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова (4 декабря 2024 г.).

Дополнительно получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Публикации. Автор имеет 9 опубликованных работ, в том числе 9 по теме диссертации, из них 9 статей, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук.

Личный вклад. Все представленные в диссертационном исследовании результаты получены автором лично под научным руководством доктора физико-математических наук, доцента Д. В. Лукьяненко. В работах, написанных в соавторстве, вклад автора диссертационной работы в результаты является определяющим.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и одного приложения. Полный объем диссертации 127 страниц, включая 40 рисунков и 11 таблиц. Список литературы содержит 47 наименований.

Основное содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава посвящена описанию некоторых хорошо известных результатов из области фундаментального исследования проблем напыления многослойных покрытий. Результаты этой главы не принадлежат автору и на защиту не выносятся, а используются для целостного изложения материалов диссертационного исследования. Во-первых, в главе детально рассмотрена математическая модель многослойных оптических покрытий. На основе этой модели представлен вывод аналитических формул, позволяющих точно рассчитать спектральные характеристики многослойных оптических покрытий. Во-вторых, подробно изложена математическая теория корреляции и эффекта самокомпенсации ошибок толщин слоёв, напыляемых с помощью широкополосного оптического контроля. Представлены формулы для расчёта оценок степени корреляции этих ошибок, а также для прогнозирования того, насколько выраженным будет эффект самокомпенсации ошибок в процессе напыления покрытия. И, в-третьих, детально описаны наиболее известные и широко применяемые алгоритмы для решения обратной задачи определения толщин слоёв напылённого

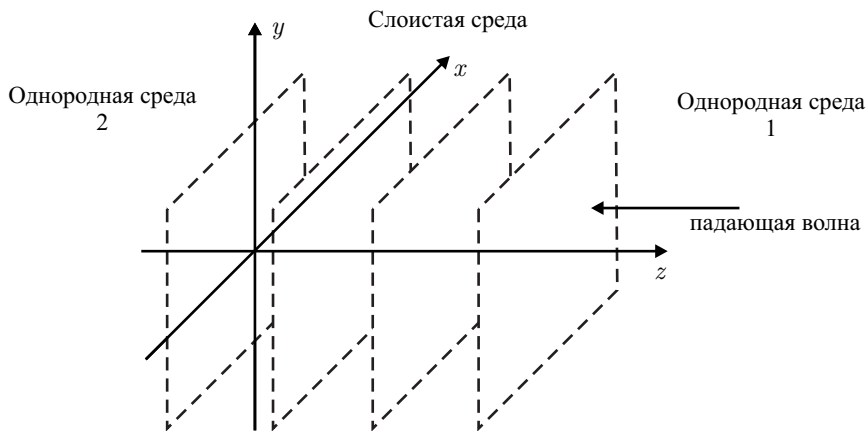


Рисунок 1 — Модель многослойного оптического покрытия

многослойного покрытия по измеренным спектральным характеристикам покрытий. Представленные в данной главе результаты используются во всех следующих главах диссертационной работы для реализации методов математического моделирования и разработки численных методов, направленных на повышение качества широкополосного оптического контроля напыления многослойных покрытий.

На рисунке 1 представлена базовая физическая модель, используемая при изучении многослойных оптических покрытий. Модель представляет собой две однородные полубесконечные изотропные среды, разделённые совокупностью плоскопараллельных изотропных слоёв, неограниченных в любом направлении. Диэлектрическая проницаемость и проводимость слоёв зависят от одной пространственной координаты, перпендикулярной границе между слоями и средой. Плоская электромагнитная волна распространяется от первой среды к границе слоя. Вследствие этого на этой границе образуются две плоские волны: отражённая волна в первой среде и волна, прошедшая сквозь границу в слой. Данная модель адекватно описывает распространение излучения в реальных многослойных оптических покрытиях, так как ширина покрытия всегда во много раз превышает длину падающей волны и общую толщину покрытия. Далее считаем эти среды и слои немагнитными (магнитная проницаемость равна 1) и предполагаем отсутствие объёмных зарядов. Оба предположения вполне стандартны в многослойной тонкоплёночной оптике. С учётом этих допущений уравнения Максвелла в среде выглядят следующим образом:

$$\nabla \times \vec{\mathcal{E}} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{\mathcal{H}}}{\partial t}, \quad \nabla \times \vec{\mathcal{H}} = \frac{\epsilon}{c} \frac{\partial \vec{\mathcal{E}}}{\partial t} + \frac{4\pi\sigma}{c} \vec{\mathcal{E}}. \quad (1)$$

Здесь $\vec{\mathcal{E}}$ — электрический вектор, $\vec{\mathcal{H}}$ — магнитный вектор, ϵ — диэлектрическая проницаемость, σ — удельная проводимость среды, c — скорость света, ∇ — дифференциальный оператор набла.

Начальные условия таковы, что поля $\vec{\mathcal{E}}$ и $\vec{\mathcal{H}}$ удовлетворяют уравнениям (1) для непрерывных значений ϵ и σ , то есть в пределах каждого слоя. А на границах между слоями, где ϵ и σ принимают разные значения для каждого слоя, непрерывность сохраняют лишь тангенциальные компоненты $\vec{\mathcal{E}}$ и $\vec{\mathcal{H}}$. Тем самым изучение поля в слоистой среде сводится к решению уравнений (1) с заданными граничными условиями, когда поле индуцируется падающей плоской электромагнитной волной.

В результате решения уравнений (1) с описанными выше граничными условиями получаем алгоритм для вычисления спектральных характеристик (в частности, пропускания) многослойного покрытия с N слоями (с известными показателями преломления n_j и толщинами d_j для каждого слоя $j = \overline{1, N}$), напылённого на подложку конечной толщины d_s с коэффициентом поглощения χ . Предполагаем, что на покрытие падает излучение с длиной волны λ .

1. Вычисляются компоненты m_{11} , m_{12} , m_{21} и m_{22} матрицы M :

$$M \equiv \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} = M_N M_{N-1} \dots M_1,$$

где

$$M_j = \begin{pmatrix} \cos \varphi_j & \frac{i}{n_j} \sin \varphi_j \\ i n_j \sin \varphi_j & \cos \varphi_j \end{pmatrix}, \quad \varphi_j = k n_j d_j, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad i = \sqrt{-1}.$$

2. Вычисляются коэффициенты пропускания для случая полубесконечной подложки

$$T_1(\lambda) = \frac{n_s}{n_a} \left| \frac{2n_a}{n_a m_{11} + n_s m_{22} + n_s n_a m_{12} + m_{21}} \right|^2,$$

$$R_1(\lambda) = \left| \frac{n_a m_{11} - n_s m_{22} + n_s n_a m_{12} - m_{21}}{n_a m_{11} + n_s m_{22} + n_s n_a m_{12} + m_{21}} \right|^2,$$

и коэффициенты пропускания для задней стороны подложки

$$T_2(\lambda) = \frac{4n_s n_a}{|n_s + n_a|^2},$$

$$R_2(\lambda) = \frac{|n_s - n_a|^2}{|n_s + n_a|^2},$$

где n_s , n_a — показатели преломления материала подложки и внешней среды соответственно.

3. Вычисляются итоговые коэффициенты пропускания и отражения для многослойной системы на подложке конечной толщины d_s :

$$T(\lambda) = \frac{T_1 T_2 e^{-\frac{4\pi}{\lambda} d_s \chi}}{1 - R_1 R_2 e^{-\frac{8\pi}{\lambda} d_s \chi}},$$
$$R(\lambda) = R_1(\lambda) + \frac{T_1^2 R_2 e^{-\frac{8\pi}{\lambda} d_s \chi}}{1 - R_1 R_2 e^{-\frac{8\pi}{\lambda} d_s \chi}}.$$

Данный алгоритм вычисления теоретической зависимости спектрального коэффициента пропускания от длины волны для произвольного покрытия используется во всём диссертационном исследовании для разработки методов математического моделирования процессов напыления оптических покрытий, разработки численных методов решения обратных задач определения параметров многослойных покрытий, и для создания комплекса проблемно-ориентированных программ, реализующих методы математического моделирования ошибок напыления.

Вторая глава посвящена рассмотрению математических методов моделирования процессов напыления многослойных покрытий с широкополосным оптическим контролем. Данные методы используются для исследования корреляции ошибок в толщинах напыляемых слоёв в процессе производства многослойных покрытий. Корреляция ошибок напыления может являться причиной эффекта кумулятивного накопления этих ошибок в толщинах всех напыляемых слоёв. Такой эффект препятствует созданию качественных оптических покрытий с большим количеством слоёв. Несмотря на это, имеется ряд многослойных покрытий, для которых существенное отклонение толщин напылённых слоёв от теоретически заданных не приводит к разрушению покрытия в смысле несоответствия спектральных характеристик целевым значениям. Наоборот, полученное многослойное оптическое покрытие полностью удовлетворяет целевым спектральным требованиям. Как указано ранее, данный эффект заключается в специфичном распределении ошибок в толщинах напылённых слоёв, при котором происходит самокомпенсация этих ошибок в процессе напыления и называется эффектом самокомпенсации ошибок. Предсказание наличия данных эффектов позволяет заранее выбрать оптимальную стратегию для создания многослойного оптического покрытия с точки зрения надёжности контроля толщин слоёв.

Исходя из этого, структура настоящей главы построена следующим образом. Сначала подробно описываются методы математического моделирования процессов напыления многослойного покрытия с широкополосным оптическим контролем, и с помощью описанного метода проводится детальное исследование эффекта кумулятивного накопления ошибок напыления. Далее в текущей главе описывается метод высокоэффективного математического моделирования большого количества коррелированных ошибок напыления. С помощью данного метода моделирования проводится исследование корреляции и эффекта

самокомпенсации ошибок напыления для различных стратегий широкополосного оптического контроля с рассмотрением нескольких многослойных покрытий, имеющих практическую значимость.

Материалы этой главы основаны на опубликованных статьях [1—5]. Наиболее показательными результатами, описанными в этой главе, являются результаты исследования эффекта кумулятивного накопления ошибок напыления и результаты применения высокоэффективного метода математического моделирования ошибок напыления.

Моделирование напыления j -го слоя N -слоистого покрытия с теоретическими толщинами слоёв d_1^t, \dots, d_N^t (толщины обозначаются верхним индексом « t » от слова *theoretical*) реализуется путём минимизации функционала невязки $\Phi(d, \tau_m)$ теоретического $T(d_1^t, \dots, d_{j-1}^t, d, \lambda)$ и «измеренного» $T^{meas}(d_1^a, \dots, d_{j-1}^a, d^a(\tau_m), \lambda, \tau_m)$ спектров коэффициента пропускания для определения напылённой на текущий момент времени толщины $d^{est}(\tau_m)$ (толщины обозначаются верхним индексом « est » от слова *estimated*):

$$d^{est}(\tau_m) = \underset{d}{\operatorname{argmin}} \Phi(d, \tau_m),$$

$$\text{где } \Phi(d, \tau_m) = \sum_{\{\lambda\}} \left[T(d_1^t, \dots, d_{j-1}^t, d, \lambda) - T^{meas}(d_1^a, \dots, d_{j-1}^a, d^a(\tau_m), \lambda, \tau_m) \right]^2. \quad (2)$$

Здесь τ_m — m -ый момент времени, $\{\lambda\}$ — набор длины волн, на которых осуществляется широкополосный контроль напыления, а d_1^a, \dots, d_{j-1}^a — «истинные» толщины ранее напылённых $j - 1$ слоёв (обозначаются верхним индексом « a » от слова *actual*), которые отличаются от d_1^t, \dots, d_{j-1}^t вследствие погрешностей контроля напыления. При этом $d^a(\tau_m)$ моделируется как $d^a(\tau_m) = d^a(\tau_{m-1}) + r_m \tau$ ($d^a(\tau_0) = 0$), где $r_m = r + \delta r(\tau_m)$ (r — скорость напыления слоя, $\delta r(\tau_m)$ — погрешность скорости напыления. Если $d_j^t < d^{est}(\tau_m)$, то процесс напыления j -го слоя закончен: $d_j^{est} \equiv d^{est}(\tau_m)$, $d_j^a \equiv d^a(\tau_m)$.

С помощью вышеописанного метода математического моделирования процесса напыления оптических покрытий было проведено исследование эффекта кумулятивного накопления ошибок на примере реального 40-слоистого оптического покрытия типа «горячее зеркало». Данный эффект явно наблюдается, например, в процессе напыления 28-го слоя покрытия, который продемонстрирован на рисунке 2. На нём можно увидеть резкое изменение значений оцененной толщины $d^{est}(\tau_m)$ напыляемого слоя в моменты времени $\tau_m \in [198, 202]$ с. На основе большого количества модельных экспериментов по напылению «горячего зеркала» было выявлено, что подобный эффект в подавляющем большинстве случаев наблюдается после напыления примерно 20-го слоя. Наряду с этим также наблюдается расхождение в значениях «истинных» (моделируемых) напылённых d_j^a толщин и теоретических d_j^t толщин, отвечающих целевым характеристикам напыляемого покрытия. Именно такое расхождение и называется кумулятивным эффектом накопления ошибок в толщинах слоёв напыляемого покрытия.

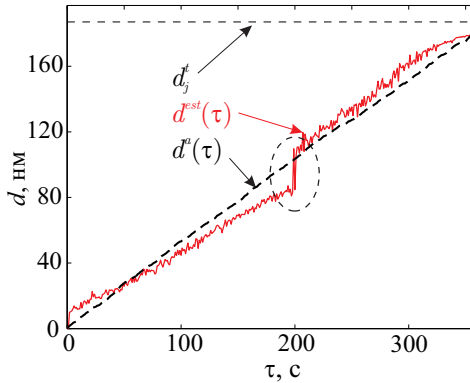


Рисунок 2 — Результат моделирования процесса напыления 28-го слоя 40-слойного покрытия типа «горячее зеркало»; пунктирными овалами отмечены особенности контроля процесса напыления

Более глубокие исследования показали, что причиной скачков d^{est} является стремительное увеличение несоответствий экспериментальных и теоретических спектральных характеристик, связанное с отличием толщин реально напылённых слоёв от их теоретических значений. Поэтому в качестве возможного способа улучшения процесса контроля было предложено после напыления первых J слоёв заменить теоретические значения толщин d_1^t, \dots, d_J^t в функционале невязки (2) на значения толщин $d_1^{ref}, \dots, d_J^{ref}$ (обозначаемые верхним индексом «ref» от слова **refined**), которые будут более близки к реально напылённым d_1^a, \dots, d_J^a . В этом случае функционал $\Phi(d, \tau_m)$ будет выглядеть как

$$\Phi(d, \tau_m) = \sum_{\{\lambda\}} \left[T \left(d_1^{ref}, \dots, d_J^{ref}, d_{J+1}^t, \dots, d_{j-1}^t, d, \lambda \right) - T^{meas} \left(d_1^a, \dots, d_{j-1}^a, d^a(\tau_m), \lambda, \tau_m \right) \right]^2. \quad (3)$$

Значения толщин $d_1^{ref}, \dots, d_J^{ref}$ можно найти, однократно решив обратную задачу определения толщин слоёв напылённого покрытия по экспериментальным спектральным характеристикам. В следующей главе рассматриваются существующие и предлагаются новые численные методы для решения таких обратных задач. На рисунке 3 представлены результаты вычислительных экспериментов, полученных при переопределении толщин слоёв после моделирования процесса напыления 25-го слоя покрытия. Из рисунка явно видно, что в результате применения метода с переопределением толщин первых 25-ти слоёв точность контроля действительно заметно повышается.

В диссертационном исследовании описанную выше проблему предлагается также решать с использованием регуляризирующих алгоритмов, учитывающих *априорную* информацию о скорости напыления слоёв и об ошибках в измеренном коэффициенте пропускания. Так, учитывая, что скорость напыления слоёв r_m на

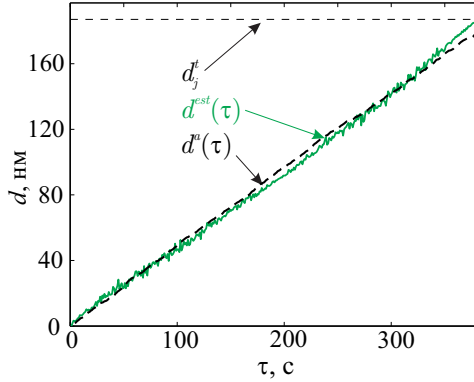


Рисунок 3 — Результат моделирования процесса напыления 28-го слоя 40-слойного покрытия типа «горячее зеркало» с учётом переопределения значений толщин первых 25-ти слоёв с использованием T -алгоритма

каждом m -ом шаге в среднем постоянна и равна r , данные $(\tau_i, d^{est}(\tau_i))$ можно аппроксимировать линейной зависимостью $y = r_m^{est}x + d_m^{shift}$ для определения коэффициентов r_m^{est} и d_m^{shift} . Зная d_m^{shift} , можно рассчитать значение $d_m^{pred} = r \cdot \tau_m + d_{m-1}^{shift}$, к которому должна стремиться толщина $d^{est}(\tau_m)$, и на основе этого построить следующий регуляризирующий алгоритм определения $d^{est}(\tau_m)^\alpha$:

$$d^{est}(\tau_m)^\alpha = \underset{d \in R^1}{\operatorname{argmin}} \left[\Phi(d, \tau_m) + \alpha |d - r \cdot \tau_m - d_{m-1}^{shift}|^2 \right], \quad (4)$$

где коэффициент α выбирается на основе обобщённого принципа невязки. На рисунке 4 показан результат применения предложенного выше подхода к регуляризации контроля напыления 28-го слоя 40-слойного покрытия типа «горячее зеркало». Как видно из рисунка, использование регуляризирующего алгоритма (4) для функционала невязки $\Phi(d, \tau_m)$ в процессе напыления слоя способствует повышению качества контроля напыления многослойных покрытий.

Далее в главе описывается метод высокоэффективного математического моделирования ошибок напыления, возникающих в процессе создания многослойных покрытий с широкополосным оптическим контролем толщин слоёв. Метод основан на определении оптимальной теоретически допустимой ошибки толщины δd_j из условия минимума функционала невязки $\Phi(\delta d_i)$, который можно представить в виде

$$\Phi_j(\delta d_j) = \sum_{\{\lambda\}} \left[\sum_{i=1}^j \frac{\partial T_j}{\partial d_i} \delta d_i + \delta T^{meas} \right]^2, \quad (5)$$

где $\frac{\partial T_j}{\partial d_i}$ — частная производная $T(d_1^t, \dots, d_{j-1}^t, d_j, \lambda)$ по d_j , $\delta d_1, \dots, \delta d_{j-1}$ — ошибки толщин, допущенные при напылении слоёв с номерами $1, \dots, j-1$, где $\delta d_j = d_j - d_j^t$ — отклонение толщины j -го слоя от его запланированного

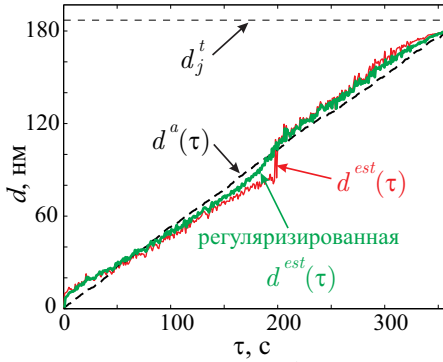


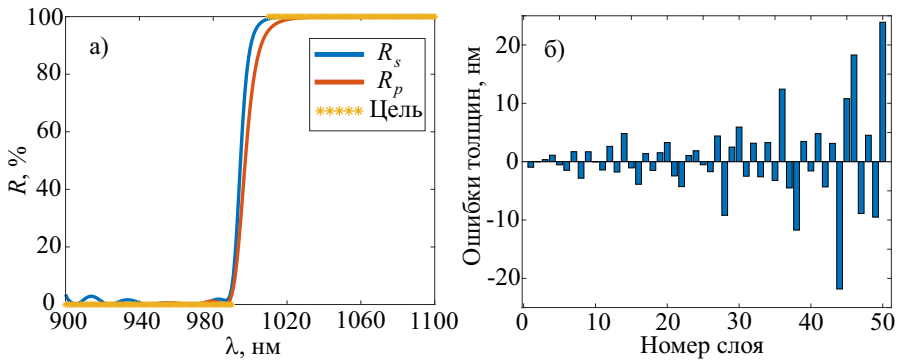
Рисунок 4 — Результаты регуляризации для функционала невязки при моделировании напыления 28-го слоя 40-слойного покрытия типа «горячее зеркало»

теоретического значения, а δT^{meas} — случайный шум в измеренных данных. Функционал (5) является квадратичным функционалом относительно δd_j . Минимизируя (5) по δd_j , получим

$$\delta d_j = - \sum_{\{\lambda\}} \left(\sum_{i=1}^{j-1} \frac{\partial T_j}{\partial d_i} \frac{\partial T_j}{\partial d_j} \delta d_i \right) / \sum_{\{\lambda\}} \left(\frac{\partial T_j}{\partial d_j} \right)^2. \quad (6)$$

Формула (6) описывает корреляцию ошибок толщин слоёв в процессе работы широкополосного оптического контроля и позволяет эффективно моделировать ошибки напыления, характерные для такого типа контроля.

Применение данного метода и исследование эффекта самокомпенсации этих ошибок было продемонстрировано на примере 50-слойного неполяризующего краевого фильтра, при напылении которого сильно проявляется эффект самокомпенсации ошибок напыления. Теоретические спектральные характеристики для фильтра предствлены на рисунке 5 а), а целевые значения коэффициента отражения отмечены на рисунке звездочками. На рисунке 5 б) изображены ошибки в толщинах слоёв, которые были получены в ходе вышеуказанного метода высокоэффективного математического моделирования ошибок напыления. Добавление этих ошибок в теоретическую конструкцию толщин слоёв рассматриваемого фильтра, как и ожидалось, не влияет на спектральную характеристику покрытия. В результате этого наблюдается практически полное соответствие финальной спектральной характеристики 50-слойного фильтра с ошибками (см. рисунок 5 б)) зависимостям, изображённым на рисунке 5 а) — имеет место эффект самокомпенсации ошибок напыления. Более того, оценки степени корреляции и оценки силы выразительности эффекта самокомпенсации ошибок напыления, полученных с помощью метода высокоэффективного математического моделирования, почти полностью совпадают с такими же оценками, рассчитанными для ошибок напыления, полученных в ходе полноценного математического моделирования процесса напыления (см. формулу (2)) 50-слойного неполяризующего краевого фильтра.



а) — спектральный коэффициент отражения для S - и P -поляризации;
 б) — ошибки толщины слоёв.

Рисунок 5 — Моделирование процесса напыления 50-слойного неполяризующего краевого фильтра

Третья глава посвящена разработке численных методов для решения обратной задачи определения толщин слоёв напылённого многослойного покрытия. Описанные в предыдущей главе подходы, направленные на борьбу с эффектом кумулятивного накопления ошибок напыления, используют информацию о толщинах фактически напылённых слоёв (см. формулу (3)). Данная информация является решением обратной задачи определения толщин уже напылённых слоёв рассматриваемого многослойного покрытия. Очевидно, для надёжной работы подходов, направленных на повышение качества широкополосного контроля, необходимо разрабатывать численные методы, которые позволят точно решать такую обратную задачу.

Исходя из этого, структура настоящей главы построена следующим образом. Сначала описывается модифицированный T -алгоритм и проводится сравнительный анализ с другими известными алгоритмами, описанными в первой главе. Далее предлагаются численные методы для построения алгоритмов решения обратной задачи, основанные на сравнении положений экстремумов экспериментальной и теоретической спектральных характеристик покрытия. Затем проводится детальное исследование по определению параметров первого напылённого слоя оптического покрытия с использованием большого объёма экспериментальных данных, получаемых в процессе напыления покрытия с широкополосным оптическим контролем.

Материалы этой главы основаны на опубликованных статьях [6—9]. Наиболее показательными результатами, описанными в этой главе, являются разработанные численные методы для решения обратной задачи определения толщин слоёв напылённого многослойного покрытия.

Для решения обратной задачи определения толщин слоёв напылённого покрытия используется вышеописанный функционал невязки теоретического и «измеренного» спектров коэффициента пропускания. Наиболее известными алгоритмами решения этой обратной задачи являются S - и T -алгоритмы. Основная

идея S -алгоритма заключается в последовательном определении толщин напылённых слоёв таким образом, что на каждом шаге работы алгоритма определяется толщина j -го слоя d_j путём минимизации следующего функционала невязки:

$$\Phi_j(d_j) = \sum_{\{\lambda\}} \left[T_j^{meas}(\lambda) - T(\hat{d}_1, \dots, \hat{d}_{j-1}, d_j, \lambda) \right]^2, \quad (7)$$

где $\hat{d}_1, \dots, \hat{d}_{j-1}$ — зафиксированные значения толщин, найденные на предыдущих шагах работы S -алгоритма, $T_j^{meas}(\lambda)$ — спектр пропускания напыляемого покрытия, измеренный в конце напыления j -го слоя, а $T(\dots)$ — функция, позволяющая рассчитать теоретический спектр пропускания для оптического покрытия с толщинами слоёв $\hat{d}_1, \dots, \hat{d}_{j-1}, d_j$ для длин волн λ . В ходе работы S -алгоритма на каждом j -ом шаге для определения d_j используется только спектр пропускания T_j^{meas} , измеренный после напыления j -го слоя. В свою очередь T -алгоритм основан на использовании всех измеренных спектров $T_1^{meas}, \dots, T_j^{meas}$ для более точного определения толщины j -го слоя d_j из условия минимума функционала невязки

$$\begin{aligned} \Phi_j(d_1, \dots, d_j) &= \sum_{i=1}^j \Phi_i^p(d_1, \dots, d_i) = \\ &= \sum_{i=1}^j \sum_{\{\lambda\}} [T_i^{meas}(\lambda) - T(d_1, \dots, d_i, \lambda)]^2. \end{aligned} \quad (8)$$

На основе S -алгоритма другими авторами был предложен модифицированный S -алгоритм, суть которого заключается в использовании также функционала невязки (7), но для определения не только текущей толщины d_j , но и толщин некоторых других напылённых слоев.

В данной главе развиваются идеи алгоритмов, описанных выше, и предлагается модифицированный T -алгоритм. Решение обратной задачи с использованием модифицированного T -алгоритма происходит на основе минимизации функционала (8), но на каждом j -ом шаге работы алгоритма определяются не все толщины d_1, \dots, d_j , а только те, для которых оценка точности A_i^j определения толщины d_i удовлетворяет неравенству:

$$A_i^j < \min_{1 \leq k \leq j-1} A_i^k. \quad (9)$$

Оценка точности A_i^j вычисляется по формуле

$$A_i^j = [\kappa^2 (B_i^j)^2 + (C_i^j)^2]^{\frac{1}{2}}, \quad \text{где} \quad (10)$$

$$B_i^j = \frac{1}{\left[\sum_{k=i}^j \sum_{\{\lambda\}} \left(\frac{\partial T_k}{\partial d_i} \right)^2 \right]}, \quad C_i^j = \frac{\left[\sum_{l=1, l \neq i}^j \left(\sum_{k=\max\{i, l\}}^j \sum_{\{\lambda\}} \frac{\partial T_k}{\partial d_i} \frac{\partial T_k}{\partial d_l} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{\left[\sum_{k=i}^j \sum_{\{\lambda\}} \left(\frac{\partial T_k}{\partial d_i} \right)^2 \right]}.$$

(11)

Коэффициент κ определяет соотношение между априорными погрешностями измерения спектральных характеристик и априорными погрешностями в определении толщин.

Сравнительный анализ работы модифицированного T -алгоритма с работой других описанных алгоритмов был проведён с помощью методов математического моделирования процесса напыления (см. формулу (2)), на примере 28-слойного поляризатора, 40-слойного покрытия типа «горячее зеркало» и 51-слойного трёхполосного фильтра. Отметим, что из-за сильного влияния эффекта кумулятивного накопления ошибок S -алгоритм не учитывался в сравнительном анализе, так как для всех покрытий, рассматриваемых в диссертационном исследовании, он работал достаточно плохо. На рисунке 6 изображены распределения значений ошибок толщин слоёв для 51-слойного трёхполосного фильтра, соответствующие работе различных алгоритмов. Как и следовало ожидать, результат модифицированного S -алгоритма оказывается наименее надёжным по сравнению с результатами работы T -алгоритма и модифицированного T -алгоритма. Анализ результатов работы описанных алгоритмов для рассматриваемых многослойных покрытий показывает явное преимущество модифицированного T -алгоритма перед T -алгоритмом и модифицированным S -алгоритмом, особенно для оптических покрытий с большим количеством слоёв ($N \geq 30$).

Далее в главе описываются S - и T -алгоритмы для решения обратной задачи, численные методы для которых основываются на сравнении положений экстремумов экспериментальных и теоретических зависимостей коэффициента пропускания напылённого многослойного покрытия (см. функционалы (12) и (13) соответственно). Такие алгоритмы позволяют решать обратную задачу в случае наличия в данных систематических ошибок.

$$\Phi_S(d_{1,j}^-) = \sum_{i=1}^{I(j)} \left(\lambda_{j,i}^e - \lambda_i^t(d_{1,j}^-) \right)^2, \quad (12)$$

$$\Phi_T(d_{1,j}^-) = \sum_{k=1}^j \Phi(d_{1,k}^-) \equiv \sum_{k=1}^j \left[\sum_{i=1}^{I(k)} \left(\lambda_{k,i}^e - \lambda_i^t(d_{1,k}^-) \right)^2 \right]. \quad (13)$$

где $\lambda_{j,i}^e$ — положение i -го экспериментального экстремума (определяется из экспериментальной спектральной зависимости $T_j^{meas}(\lambda)$ после напыления j слоёв), $\lambda_i^t(d_{1,j}^-)$ — положение i -го теоретического экстремума (определяется из теоретической спектральной зависимости коэффициента пропускания от длины волны,

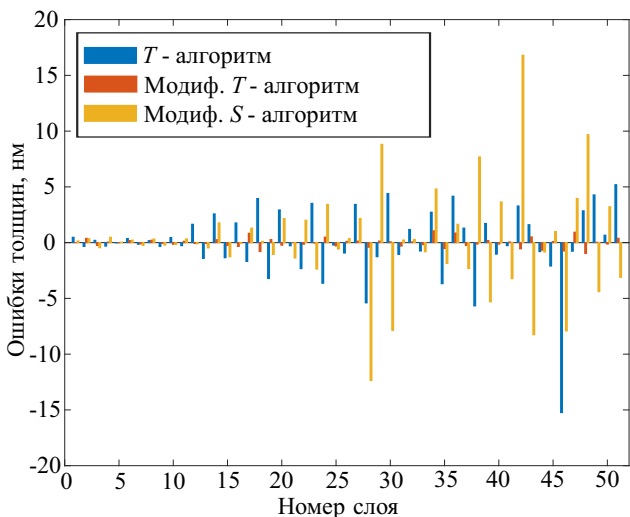


Рисунок 6 — Ошибки толщин слоёв, полученные в результате работы различных алгоритмов для 51-слоистого трёхполосного фильтра

как итог решения прямой задачи по определению оптических параметров многослойной системы, состоящей из j слоёв), $I(j)$ — количество экстремумов теоретической спектральной характеристики покрытия с j напылёнными слоями. На рисунке 7 представлены результаты работы S - и T -алгоритмов для модельного покрытия. Из него видна явная работоспособность описанных алгоритмов, к тому же прослеживается знакомое поведение более высокой эффективности T -алгоритма по сравнению с S -алгоритмом.

В конце третьей главы обсуждается вопрос повышения точности контроля толщин слоёв оптических покрытий гораздо глубже, чем это было сделано во второй главе. При работе широкополосного оптического контроля напыления многослойных покрытий накапливаются огромные массивы экспериментальных данных, измеряемых внутри напылительной камеры через короткие интервалы времени порядка одной или нескольких секунд. Наличие таких объёмов экспериментальных данных позволяет разрабатывать более точные модели слоёв оптических покрытий. Как было уже указано ранее, широкополосному оптическому контролю присущ эффект кумулятивного накопления ошибок напыления. Особенно сильное негативное воздействие на точность контроля всего покрытия могут оказать ошибки в параметрах первого слоя покрытия, поскольку также существует так называемая проблема первого слоя. Её суть заключается в том, что, в отличие от всех остальных слоёв, первый слой напыляется на чистую подложку, что часто приводит к заметному отличию его показателя преломления от показателей преломления последующих слоёв из того же материала. Возможны и другие особенности первого слоя покрытия. Поэтому повышение точности определения параметров первого слоя имеет определяющее значение для качества широкополосного контроля процесса напыления всего покрытия в целом.

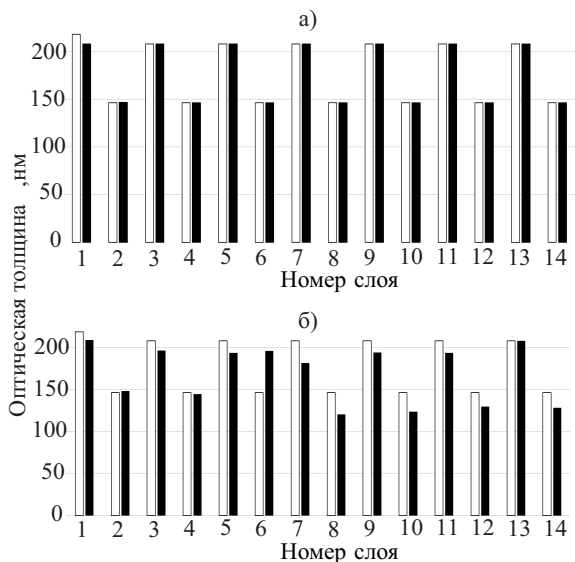


Рисунок 7 — Результат работы алгоритмов в виде оптических толщин: а) — T -алгоритма; б) — S -алгоритма. Столбцы белого цвета — реальные значения толщин, столбцы черного цвета — значения толщин, полученные как итог работы алгоритма

В частности, в данной главе представлен детальный анализ контроля напыления первого слоя. Обсуждается обоснованный выбор математической модели слоя. При моделировании учитываются все имеющиеся в распоряжении экспериментальные данные и вся априорная информация об искомым параметрах модели, а также анализируются результаты вычислительных экспериментов.

В четвёртой главе описывается прикладной комплекс проблемно-ориентированных программ для математического моделирования ошибок напыления, возникающих в процессе создания многослойных покрытий с широкополосным оптическим контролем толщин слоёв. Комплекс ориентирован на численное математическое моделирование большого количества коррелированных ошибок напыления, которые могут возникать в процессе напыления многослойного покрытия с широкополосным оптическим контролем толщин слоёв. Архитектура комплекса предусматривает возможность его использования как в исследовательской, так и в производственной среде на персональных домашних компьютерах.

Материалы этой главы основаны на опубликованных статьях [3—5] и зарегистрированной программе для ЭВМ. Наиболее показательными результатами, описанными в этой главе, являются результаты применения высокоэффективного метода математического моделирования ошибок напыления.

Основной целью разработки программного комплекса является математическое моделирование ошибок, возникающих в процессе напыления многослойного покрытия с широкополосным оптическим контролем за приемлемое

время в большом количестве. Проблема использования полноценного метода математического моделирования процесса напыления многослойных покрытий, описанного в первой половине второй главы, заключается в скорости работы. Время, которое потребуется для математического моделирования хотя бы нескольких тысяч наборов ошибок напыления, составляет порядка нескольких десятков часов. Для статистического анализа корреляции и эффекта самокомпенсации ошибок напыления необходимо иметь в наличии от сотен тысяч до миллиона наборов таких ошибок. Метод высокоэффективного математического моделирования ошибок напыления позволяет достичь этой цели.

Для высокоэффективного математического моделирования ошибок напыления программный комплекс принимает на вход следующую информацию:

- набор толщин слоёв многослойного оптического покрытия;
- показатели преломления материалов, из которых состоят подложка и слои покрытия;
- набор длин волн, на котором проводится широкополосный контроль напыления покрытия;
- величины случайных ошибок толщин для каждого слоя, которые моделируют случайные факторы производственных экспериментов.

Архитектурно программный комплекс построен по модульному принципу и включает следующие функциональные блоки:

1. **Модуль вычисления спектральных характеристик** — отвечает за вычисление спектральных характеристик пропускания оптического покрытия.
2. **Модуль вычисления производных спектральных характеристик** — отвечает за предварительный расчёт всех производных спектральных характеристик по толщинам слоёв.
3. **Модуль моделирования ошибок напыления** — реализует рекуррентный алгоритм моделирования ошибок толщин слоёв многослойного оптического покрытия.

По итогам завершения работы алгоритма математического моделирования программный комплекс выдает набор ошибок, которые соответствуют ошибкам, получаемым в процессе напыления многослойных покрытий с широкополосным оптическим контролем толщин слоёв. Смоделированные ошибки оказываются скоррелированными за счёт широкополосного контроля, но при этом содержат случайную составляющую, которая соответствует совокупной погрешности напыления, возникающей в реальном производственном процессе. Предлагаемый комплекс программ позволяет моделировать сотни тысяч и даже миллионы наборов ошибок, получаемых в процессе напыления многослойных покрытий, за время порядка нескольких десятков минут. Более того, данный метод позволяет моделировать ошибки напыления для случая широкополосного контроля толщин слоёв по нескольким датчикам. Например, процесс напыления многослойного покрытия может быть реализован с контролем по двум датчикам, где первый соответствует контролю чётных слоёв, а второй — контролю нечётных слоёв.

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Разработаны методы математического моделирования процесса напыления многослойных покрытий с широкополосным оптическим контролем толщин слоёв, с помощью которых предложены новые подходы, направленные на повышение качества широкополосного контроля.
2. Разработаны численные методы для определения времени окончания напыления слоя многослойного покрытия и для решения обратной задачи определения толщин напылённых слоёв по измеренным спектральным характеристикам многослойного покрытия с целью повышения качества широкополосного оптического контроля.
3. Создан комплекс проблемно-ориентированных программ, реализующий метод математического моделирования ошибок, получаемых в процессе напыления многослойных покрытий с широкополосным оптическим контролем толщин слоёв, который позволяет эффективно проводить исследование корреляции и эффекта самокомпенсации ошибок напыления для определения наиболее оптимальной стратегии широкополосного оптического контроля с целью создания высококачественных многослойных покрытий.

Публикации автора по теме диссертации

Научные статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук:

1. Исаев Т. Ф., Кочиков И. В., Лукьяненко Д. В., Тихонравов А. В., Ягола А. Г. Повышение точности широкополосного контроля процесса напыления оптических покрытий // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. — 2018. — № 4. — С. 45—50. EDN: YXERBR. Импакт-фактор 0,125 (РИНЦ). 0,35 из 0,43 п.л.
Перевод: T. F. Isaev, I. V. Kochikov, D. V. Lukyanenko, A. V. Tikhonravov, A. G. Yagola. Improving the accuracy of broad-band monitoring of optical coating deposition // Moscow University Physics Bulletin. — 2018. — vol. 73., no. 4. — pp. 382–387. EDN: TBFWZL. Импакт-фактор 0,4 (JIF). 0,43 / 0,34 п.л.
2. Isaev T. F., Kochikov I. V., Lukyanenko D. V., Tikhonravov A. V., Yagola A. G. Regularizing algorithms for the determination of thickness of deposited layers in optical coating production // Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications. — 2018. — vol. 6., no. 4. — pp. 38—47. EDN: COOTRI. Импакт-фактор 0,4 (JIF). 0,71 / 0,65 п.л.
3. Тихонравов А. В., Кочиков И. В., Матвиенко И. А., Исаев Т. Ф., Лукьяненко Д. В., Шарапова С. А., Ягола А. Г. Корреляция ошибок при

- напылении оптических покрытий с широкополосным оптическим контролем // Вычислительные методы и программирование. — 2018. — Т. 19. — № 4. — С. 439—448. EDN: VQSWKB. Импакт-фактор 0,737 (РИНЦ). 0,35 из 0,71 п.л.
4. Tikhonravov A., Kochikov I., Matvienko I., Isaev T., Yagola A. Strategies of broadband monitoring aimed at minimizing deposition errors // *Coatings*. — 2019. — vol. 9., no. 12. — p. 809. EDN: NPQCSK. Импакт-фактор 2,8 (JIF). 0,71 / 0,32 п.л.
5. Исаев Т. Ф., Тихонравов А. В., Ягола А. Г. О выборе стратегий широкополосного оптического контроля напыления многослойных покрытий // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. — 2021. — № 1. — С. 30—35. EDN: MTTVTF. Импакт-фактор 0,125 (РИНЦ). 0,37 из 0,43 п.л.
Перевод: T. F. Isaev, A. V. Tikhonravov, A. G. Yagola. On the choice of a strategy for broadband optical monitoring of the deposition of multilayer coatings // *Moscow University Physics Bulletin*. — 2021. — vol. 76., no. 1. — pp. 36–41. EDN: WUXKDA. Импакт-фактор 0,4 (JIF). 0,43 / 0,34 п.л.
6. Исаев Т. Ф., Кочиков И. В., Лукьяненко Д. В., Тихонравов А. В., Ягола А. Г. Сравнение алгоритмов решения задачи определения толщин слоев оптических покрытий в режиме “on-line” // Журнал вычислительной математики и математической физики. — 2019. — Т. 59. — № 3. — С. 494—504. EDN: YZRAPJ. Импакт-фактор 0,522 (РИНЦ). 0,67 из 0,78 п.л.
Перевод: T. F. Isaev, I. V. Kochikov, D. V. Lukyanenko, A. V. Tikhonravov, A. G. Yagola. Comparison of algorithms for determining the thickness of optical coatings online // *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. — 2019. — vol. 59, no. 3. — pp. 465–474. EDN: HEDOHF. Импакт-фактор 0,7 (JIF). 0,71 / 0,62 п.л.
7. Tikhonravov A., Kochikov I., Isaev T., Lukyanenko D., Yagola A. On-line characterization algorithms for optical coating production with broadband monitoring // *Coatings*. — 2018. — vol. 8., no. 9. — p. 323. EDN: CFXKRR. Импакт-фактор 2,8 (JIF). 0,71 / 0,38 п.л.
8. Исаев Т. Ф., Лукьяненко Д. В., Тихонравов А. В., Ягола А. Г. Алгоритмы решения обратных задач оптики слоистых сред на основе сравнения экстремумов спектральных характеристик // Журнал вычислительной математики и математической физики. — 2017. — Т. 57. — № 5. — С. 867—875. EDN: YRWNVB. Импакт-фактор 0,522 (РИНЦ). 0,5 из 0,64 п.л.
Перевод: T. F. Isaev, D. V. Lukyanenko, A. V. Tikhonravov, A. G. Yagola. Algorithms for Solving Inverse Problems in the Optics of Layered Media Based on Comparing the Extrema of Spectral Characteristics // *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. — 2017. — vol. 57., no. 5. — pp. 867—875. EDN: XNJJKT. Импакт-фактор 0,7 (JIF). 0,64 / 0,5 п.л.

9. Исаев Т. Ф., Лагутин Ю. С., Лагутина А. А., Лукьяненко Д. В., Про-совский О. Ф., Тихонравов А. В., Ягола А. Г. Определение параметров первого слоя покрытия при широкополосном оптическом контроле процесса напыления // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. — 2021. — № 5. — С. 91—97. EDN: PXBYZN. Импакт-фактор 0,125 (РИНЦ). 0,43 из 0,5 п.л.

Перевод: T. F. Isaev, I. S. Lagutin, A. A. Lagutina, D. V. Lukyanenko, O. F. Prosovskiy, A. V. Tikhonravov, A. G. Yagola. Determination of the parameters of the first coating layer using broadband optical monitoring of the deposition process // Moscow University Physics Bulletin. — 2021. — vol. 76., no. 5. — pp. 356–362. EDN: VASTJR. Импакт-фактор 0,4 (JIF). 0,5 / 0,4 п.л.

Исаев Тему́р Фу́ркатович

Моделирование процессов напыления многослойных покрытий с широкополосным
оптическим контролем толщин слоёв

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать _____._____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____