

**ОТЗЫВ официального оппонента  
на диссертацию на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
Исаева Темура Фуркатовича  
на тему: «Моделирование процессов напыления многослойных  
покрытий с широкополосным оптическим контролем толщин слоёв»  
по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные  
методы и комплексы программ**

Рассматриваемая диссертационная работа посвящена разработке и исследованию методов математического моделирования процессов напыления многослойных оптических покрытий с широкополосным оптическим контролем толщин слоев. Работа ориентирована на решение сложных задач, связанных с учётом ошибок измерений и их влияния на характеристики формируемых покрытий.

**Актуальность** темы диссертационной работы определяется необходимостью совершенствования методов контроля процессов напыления многослойных покрытий, широко используемых в различных областях современной техники. Достижение требуемых спектральных характеристик покрытий напрямую зависит от точности контроля толщин отдельных слоёв, что делает задачу контроля ключевой для всей технологической цепочки. Широкополосный оптический контроль, являясь одним из наиболее эффективных методов, одновременно предъявляет высокие требования к алгоритмам обработки измерений. В частности, существенное влияние оказывают ошибки, возникающие на различных этапах процесса напыления, которые обладают сложной структурой и могут накапливаться по мере увеличения числа слоёв. В этой связи разработка методов математического моделирования, позволяющих анализировать влияние ошибок и разрабатывать эффективные стратегии контроля, представляет собой актуальную научную задачу.

Таким образом, разработка методов математического моделирования процессов напыления, численных алгоритмов контроля толщин слоёв, а

также исследование корреляционных свойств ошибок напыления являются актуальными и важными научными задачами. Диссертационная работа направлена на решение указанных задач, что определяет её актуальность и научную значимость.

### **Степень обоснованности научных положений и выводов.**

Положения, выносимые на защиту, являются обоснованными и логически вытекают из проведённого исследования.

Обоснованность результатов обеспечивается:

- использованием современных методов математического моделирования, основанных на уравнениях физической оптики и теории тонкопленочных покрытий;
- применением аппарата численных методов, включая методы решения обратных и некорректно поставленных задач;
- корректной постановкой задач моделирования процессов напыления и контроля толщин слоёв;
- проведением вычислительных экспериментов, подтверждающих работоспособность предложенных подходов;
- сопоставлением результатов моделирования с экспериментальными данными.

Автором продемонстрирована высокая степень владения методами математического моделирования, численного анализа и прикладного программирования, что позволило получить обоснованные и достоверные научные результаты.

### **Достоверность полученных результатов.**

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается:

- использованием апробированных моделей распространения электромагнитных волн в многослойных структурах;
- применением корректных численных методов решения прямых и обратных задач;

- проведением широкого спектра вычислительных экспериментов;
- использованием данных натуральных экспериментов при анализе процессов напыления;
- апробацией результатов на научных конференциях и семинарах;
- публикацией результатов в высокорейтинговых рецензируемых научных изданиях.

Кроме того, разработанные алгоритмы реализованы в виде программного комплекса, что дополнительно подтверждает их корректность и практическую применимость.

**Научная новизна** диссертационного исследования заключается в следующем. Разработаны оригинальные методы математического моделирования процессов напыления многослойных покрытий с широкополосным оптическим контролем, реализованные в виде комплекса программ. Предложены новые подходы к определению момента остановки напыления слоя, обеспечивающие повышение надёжности контроля. Проведено оригинальное исследование процесса напыления первого слоя покрытия с использованием данных натурального эксперимента. Разработан метод высокоэффективного математического моделирования ошибок толщин, учитывающий их корреляционные свойства. Впервые проведено комплексное исследование корреляции и эффекта самокомпенсации ошибок в толщине слоёв многослойных покрытий на основе вычислительного эксперимента. Предложены новые численные методы решения обратной задачи определения толщин напылённых слоёв по спектральным характеристикам покрытия. Полученные результаты обладают существенной научной новизной и расширяют существующие представления о процессах напыления многослойных покрытий.

#### **Оценка содержания диссертации.**

Диссертационная работа имеет чёткую логическую структуру, состоит из введения, четырёх глав и заключения. Представленный материал изложен

последовательно, язык работы соответствует требованиям, предъявляемым к научным исследованиям.

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, определены объект и предмет исследования, приведены положения, выносимые на защиту, раскрыта научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

**Первая глава** носит обзорно-теоретический характер и посвящена представлению существующих подходов к моделированию многослойных оптических покрытий. В ней подробно изложены математические основы описания распространения электромагнитных волн в многослойных средах, приведены аналитические зависимости для расчёта спектральных характеристик покрытий, а также рассмотрены методы анализа корреляции ошибок и эффекта их самокомпенсации. Кроме того, приведён обзор существующих методов решения обратных задач определения толщин слоёв. Представленные в главе материалы служат необходимой теоретической базой для последующих исследований, представленных в диссертационной работе.

**Во второй главе** разработаны методы математического моделирования процессов напыления многослойных покрытий. На основе предложенных моделей и примера реальных многослойных покрытий проведено исследование эффекта кумулятивного накопления ошибок в толщинах слоёв и предложены подходы борьбы с ним. Особое внимание уделено разработке метода высокоэффективного моделирования ошибок напыления, позволяющего учитывать их корреляционные свойства и моделировать процессы, близкие к реальным технологическим условиям. Полученные результаты имеют существенное значение для анализа устойчивости процессов контроля.

**В третьей главе** представлены численные методы решения обратной задачи определения толщин слоёв по измеренным спектральным характеристикам. Предложен новый алгоритм решения данной задачи,

проведён его сравнительный анализ с существующими подходами, а также рассмотрены методы, основанные на анализе экстремумов спектральных характеристик. Дополнительно выполнено исследование параметров напыления первого слоя покрытия с использованием экспериментальных данных. Результаты главы свидетельствуют о высокой эффективности предложенных методов.

**В четвёртой главе** описан разработанный автором комплекс проблемно-ориентированных программ, реализующий метод математического моделирования ошибок напыления. Представленный программный комплекс позволяет проводить вычислительные эксперименты, направленные на исследование ошибок в толщинах слоев, которые возникают в процессе напыления многослойных покрытий, предоставляя возможность заранее выбирать оптимальные стратегии широкополосного оптического контроля.

В целом содержание диссертации соответствует поставленным целям и задачам, изложение материала является логичным и последовательным, а полученные результаты обоснованы и взаимосвязаны. Работа производит целостное впечатление завершённого научного исследования.

#### **Замечания по работе.**

Несмотря на высокую научную и практическую значимость диссертации, следует отметить ряд замечаний:

1. В работе предлагаются численные методы определения момента завершения напыления слоя, однако их устойчивость при существенном рассогласовании между теоретической моделью и реальными параметрами процесса (например, при ошибках в показателях преломления материалов или нестабильности скорости напыления) исследована недостаточно подробно.
2. При анализе спектральных характеристик покрытий используется ряд допущений (например, идеальность границ слоёв, однородность материалов), влияние которых на точность результатов моделирования

и применимость методов в реальных условиях рассмотрено недостаточно детально.

3. Во многих местах диссертации фигурирует фраза «Моделирование процессов напыления многослойных покрытий...», которая недостаточно адекватно отражает суть проделанной работы. Сам процесс напыления в данной диссертации не моделируется, но моделируются оптические характеристики рассматриваемых покрытий, в том числе и в процессе их напыления. Полученные при расчетах оптические характеристики сравниваются с целевыми значениями, и результаты этого сравнения учитываются в режиме напыления.

4. Слои могут иметь анизотропный показатель преломления из-за внутренних напряжений, возникающих при напылении. Вопрос о том, могут ли развитые в данной работе методы быть применимы к этому случаю.

5. В диссертации нет никакой информации о временах расчетов с использованием различных алгоритмов, а также и о том, на каких вычислительных ресурсах проводились расчеты.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова. Диссертационное исследование оформлено согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Исаев Темур Фуркатович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,  
заведующий лабораторией вычислительных систем и  
прикладных технологий программирования  
Научно-исследовательского вычислительного центра  
Московского государственного университета  
имени М.В. Ломоносова  
СУЛИМОВ Владимир Борисович

\_\_\_\_\_  
Дата: 04.05.2026 г.

Контактные данные:

тел.: 7(495) 939-24-81, e-mail: v.sulimov@srcc.msu.ru  
Специальность, по которой официальным оппонентом  
защищена диссертация:  
01.04.10 – Физика полупроводников и диэлектриков

Адрес места работы:

119234, г. Москва, ул. Ленинские горы, д. 1, стр. 4,  
НИВЦ МГУ имени М.В. Ломоносова, лаборатория вычислительных  
систем и прикладных технологий программирования  
Тел.: 7 (495) 939-24-81; e-mail: v.sulimov@srcc.msu.ru

Подпись сотрудника  
НИВЦ МГУ имени М.В. Ломоносова  
В.Б. Сулимова удостоверяю:  
Ученый секретарь

\_\_\_\_\_  
В.В. Суворов  
дата