

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию **Семёнова Захара Владимировича** на тему:
«Исследование метода непрямого оптического контроля толщин многослойных покрытий в широком спектральном диапазоне»,
представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

Успехи в области фотоники в значительной степени определяются прогрессом в создании её элементной базы, включая прецизионные оптические элементы на основе многослойных покрытий. Они широко применяются в современной оптике. Их технические характеристики во многом зависят от эффективности систем контроля (мониторинга) нанесения слоёв покрытия. Работа З.В. Семёнова посвящена исследованию и разработке одного из перспективных методов контроля, а именно: метода непрямого широкополосного контроля с нахождением толщины покрытия путём решения обратной задачи в процессе его нанесения. Его применение позволяет заметно повысить качество создаваемых оптических элементов. С этой точки зрения тема диссертации З.В. Семёнова является **актуальной**, а поставленная перед автором задачи исследования и практического применения метода непрямого широкополосного контроля нанесения покрытий с определением толщины наносимых слоёв в реальном времени – важными и своевременными.

Структура диссертации и оценка её содержания

Диссертация изложена на 157 страницах, из них 151 страница основного текста, включая 45 рисунков, 4 таблицы, и 6 страниц с приложениями. Диссертация состоит из введения, четырёх разделов, заключения, списка литературы и трёх приложений. Положительно можно отметить обширный список литературных источников, состоящий из 125 наименований.

Во введении отражена актуальность темы исследования, определены цель и задачи работы, сформулированы научная новизна, значимость и обоснованность работы, личный вклад и основные защищаемые положения.

В первом разделе приведён обзор существующих методов оптического и неоптического контроля, проведено их сравнение и отражены известные достоинства и недостатки. Данная обзорная глава является объёмной (35 страниц), посвящена преимущественно оптическим методам и содержит большое количество ссылок на современные зарубежные публикации, что говорит о хорошей проработанности темы. На основании данного обзора и классификации методов автором выбран не прямой широкополосный контроль для исследования и применения в разрабатываемой системе контроля.

Второй раздел посвящён исследованию влияния ряда характеристик элементов системы на погрешности контроля наносимых слоёв. Для данного исследования предложена компьютерная модель системы контроля и проведено исследование с применением компьютерного моделирования. Среди рассматриваемых факторов и характеристик: шум линейки фотодетекторов, спектральный диапазон контроля и количество фотодетекторов, погрешность градуировки спектрометра по длинам волн, дрейф интенсивности источника излучения, а также погрешности показателя преломления материала слоя. В результатах главы даны практические рекомендации для снижения погрешностей широкополосного контроля, определены оптимальные толщины слоя и дана оценка для возможных минимальных погрешностей измерения для разрабатываемой системы контроля.

В третьем разделе рассматривается проблема определения толщины тонких слоёв, которые являются первыми на контрольной подложке (наблюдается высокий уровень погрешностей). С помощью компьютерного моделирования показаны наличие данной проблемы и предпосылки для её решения. Предложен новый метод контроля с предварительно нанесённым слоем, который позволяет существенно снизить погрешности измерения

толщин таких слоёв. На данный метод соискателем получен патент РФ на способ измерения, что подтверждает его новизну.

Четвёртый раздел посвящён разработке и экспериментальному применению образца системы широкополосного контроля. Изложена техническая информация об основных использованных элементах системы, приведена её оптическая схема. Для управления системой контроля соискателем разработано программное обеспечение, основные возможности которого также представлены в данном разделе. Приведены несколько примеров покрытий, созданных на вакуумной установке, оснащённой данной системой контроля, для просветляющего покрытия приведено сравнение с существующими предложениями различных производителей многослойных покрытий. Приведено сравнение разработанной системы с лучшими зарубежными аналогами и показано преимущество созданной системы по совокупности характеристик.

В заключении изложены основные научные и практические результаты работы, полученные в ходе диссертационного исследования.

Диссертационная работа производит хорошее впечатление и выглядит как завершённое научное исследование. Автореферат соответствует содержанию диссертации. Тематика и содержание диссертации З.В. Семёнова соответствует паспорту специальности 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы.

Научная новизна полученных результатов заключена, прежде всего, в исследовании метода непрямого широкополосного контроля с помощью компьютерного моделирования, решении проблемы контроля тонких стартовых слоёв и создании опытного образца системы контроля, поддерживающей рассмотренные и предложенные решения. В частности, в работе:

1. предложена компьютерная модель системы непрямого широкополосного контроля, которая в отличие от известных решений позволяет исследованность

влияние характеристик основных элементов системы контроля на достигаемые погрешности измерения толщин контролируемых слоёв;

2. показано существование диапазонов оптимальных толщин слоя, при которых достигаются наименьшие погрешности измерения, и определены такие диапазоны для двух материалов (SiO_2 и TiO_2) в рамках впервые проведённого исследования с помощью компьютерного моделирования;

3. предложен новый метод контроля нанесения тонких слоёв, которые являются первыми на контрольных подложках, который позволяет в разы снизить погрешность измерения их толщин;

4. предложено и разработано физико-техническое решение системы контроля, которая в отличие от известных решений позволяет проводить прямой и непрямой широкополосный контроль нанесения по спектрам отражения многослойных покрытий с определением толщины и скорости нанесения слоёв в реальном времени с помощью решения обратной задачи.

Защищаемые положения диссертации соответствуют цели и задачам научного исследования. При выполнении диссертации **решена важная научно-техническая задача** создания системы контроля, работающей методом широкополосного оптического контроля с регистрацией спектров отражения и нахождением толщины слоя в процессе его нанесения путём численного решения обратной задачи.

Практическая значимость полученных результатов

Разработанной системой контроля была оснащена вакуумная установка Института лазерной физики СО РАН, о чём в работе представлен Акт о внедрении. На данной установке с помощью системы контроля были изготовлены различные высококачественные покрытия. Изготовленные таким образом просветляющие покрытия нашли применение на Новосибирском приборостроительном заводе с целью повышения коэффициента

светопропускания изделий до уровня лучших зарубежных аналогов, что также подтверждается Актом о внедрении.

В работе изложены практические рекомендации для снижения случайных и систематических погрешностей измерения толщин наносимых слоёв при использовании метода непрямого широкополосного контроля.

Результаты исследований З.В. Семёнова могут быть использованы в научных институтах и оптико-механических заводах страны для создания высококачественных оптических покрытий путём модернизации существующих вакуумных установок разработанной системой контроля.

Достоверность и обоснованность результатов работы обеспечена положительным опытом применения образца системы контроля в составе вакуумной установки в Институте лазерной физике СО РАН, а также высоким уровнем получаемых с её помощью спектральных покрытий.

Результаты диссертации З.В. Семёнова в должной мере **опубликованы** в рецензируемых научных изданиях. Из 11 научных работ, опубликованных по теме диссертации, 3 статьи входят в журналы Перечня ВАК РФ, 2 публикации индексируются базами Scopus и Web of Science. Кроме того автор является заявителем 1 патента РФ на способ и 2 свидетельств РФ на программное обеспечение для ЭВМ.

Замечания по работе:

1. В пункте 2 основных положений, выносимых на защиту, следовало бы конкретизировать диапазон оптимальных толщин слоя, при которых достигаются наименьшие погрешности измерения, а также конкретизировать толщины, при которых наблюдается высокая погрешность измерений.

2. Недостаточно подробно описан процесс нанесения многослойного покрытия и параметров его нанесения. Так, отсутствует информация о

характерных временах нанесения слоёв и скоростях нанесения для различных материалов, используемых на установке.

3. Не освещена возможность измерения толщин плёночных структур, содержащих металлические плёнки. Возможно ли применение разработанной системы для создания оптических покрытий с металлическими слоями?

4. В работе преимущественно используется физическая толщина наносимых слоёв, в то время как методы широкополосного оптического контроля подразумевают измерение оптической толщины. Из-за этого создаётся впечатление, что предлагаемые решения не способны измерять оптическую толщину, а ведь именно возможность определения оптической толщины слоя является одним из главных достоинств оптических методов мониторинга.

5. В работе показано, что погрешность показателя преломления наносимых материалов является важным фактором, от которого зависит погрешность определения толщины наносимого слоя. Однако в работе не изложены механизмы, с помощью которых на практике определяются эти показатели преломления, и есть ли какие-то способы снижения погрешностей их определения.

Отмеченные замечания не снижают общую положительную оценку работы.

Заключение

Диссертация Семёнова З.В. является самостоятельной, завершённой исследовательской работой, в которой содержится новое решение важной научно-технической задачи создания системы контроля в широком спектральном диапазоне, способной контролировать процесс нанесения многослойных оптических покрытий с измерением толщины слоя и скорости его нанесения в реальном времени в процессе нанесения. На основании этого считаю, что диссертация Семёнова Захара Владимировича соответствует требованиям «Положения о присуждении учёных степеней» ВАК Российской

Федерации (Постановление Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Семёнов Захар Владимирович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы.

Официальный оппонент,

Чугуй Юрий Васильевич

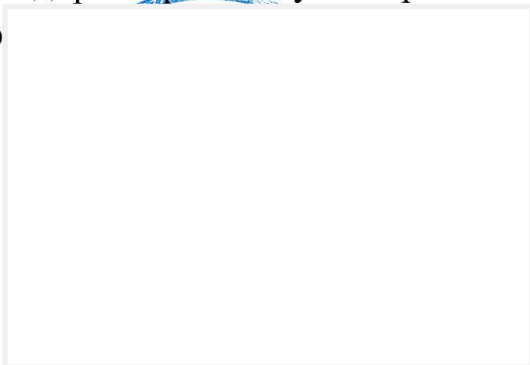
доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
научный руководитель ФГБУН
Конструкторско-технологический институт
научного приборостроения Сибирского
отделения Российской академии наук



Юрий Васильевич Чугуй

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Конструкторско-технологический институт научного приборостроения Сибирского отделения Российской академии наук (КТИ НИ СО РАН)
630058, г. Новосибирск, ул. Русская, 41
Телефон: (383)306-58-95 (приёмная – 306-62-08)
<http://www.tdisie.nsc.ru>
Адрес электронной почты: chugui@tdisie.nsc.ru

Подпись доктора технических наук, профессора Ю.В. Чугуя удостоверяю
Заместитель директора по научной работе КТИ НИ СО РАН,
кандидат ф



Игорь Николаевич Куропятник

С отзывом ознакомлен 04.12.2019

Семёнов М.А.

С отзывом ознакомлен 06.12.2019 Семёнов З.В.