

УТВЕРЖДАЮ

ВрИО директора по научной работе и инновациям АО «ГОИ им. С.И. Вавилова»

Л.Н. Архипова

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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

Актуальность диссертации

Практически все рабочие поверхности оптических элементов, входящих в состав современных оптических и оптико-электронных приборов от очков до рамановских (КР) спектрометров, содержат многослойные оптические покрытия, спектральные характеристики которых существенно влияют на качество результатов, получаемых с помощью этих приборов. Точность спектральных характеристик покрытий во многом определяется возможностью прецизионного измерения текущей толщины слоя и момента остановки нанесения материала в вакуумных установках, на которых изготавливаются многослойные покрытия. В настоящее время наибольшей наглядностью и достоверностью с высоким потенциалом снижения погрешности измерения толщин слоёв обладает метод оптического контроля в широкой спектральной области (широкополосный контроль) благодаря доступности современных малогабаритных спектрометров на основе линеек фотодетекторов. Получение наименьшей погрешности измерения толщины наносимого слоя, независимо от оптических характеристик создаваемого фильтра, возможно методом непрямого широкополосного оптического контроля. Создание новых эффективных систем контроля на основе этого метода является **актуальной и важной задачей.**

Диссертация Семёнова З.В. 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 создание опытного образца системы контроля на его основе. В связи с этим актуальность работы Семёнова З.В. не вызывает сомнений, как с точки зрения научных исследований, так и прикладных применений.

Соискателем показано, что наиболее универсальным и перспективным методом повышения точности измерения толщин слоёв является метод непрямого широкополосного 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. Поэтому образец системы контроля создан соискателем на основе этого метода.

Научная новизна

В качестве новых научных результатов соискателем выдвинуты следующие положения:

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

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

Научная и практическая значимость 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.

Достоверность исследований, представленных в диссертации Семёнова, 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.

Замечания по диссертации и автореферату

1. В разделе 2.3 диссертации с помощью компьютерного моделирования показано, что при достаточно высокой погрешности показателя преломления материала возможна ситуация, когда используемые алгоритмы не способны корректно решать обратную задачу и находить толщину слоя из-за слишком большого расхождения теоретических и зарегистрированных спектров (рисунок 19). Однако в работе отсутствует информация о том, были ли такие ситуации при практическом применении созданной системы. И если нет, то были ли попытки воспроизвести эту ситуацию, предсказанную автором на этапе моделирования?
2. В разделе 4.1 сказано, что для компактности системы контроля использовался волоконно-оптический кабель с диаметром световода 1 мм. Это сильно

- многомодовое оптическое волокно. Как в Вашей схеме случайный изгиб оптического волокна влиял на интенсивность измеряемого спектра и, соответственно, на результаты контроля?
3. В работе сказано, что разработанная система регистрирует спектры, рассчитывает толщину слоя, скорость его нанесения и определяет момент остановки в ходе нанесения слоя автоматически. Однако в работе отсутствует информация о автоматизации и управлении самой вакуумной установкой («ВУ-2М»), что необходимо для полностью автономного нанесения слоя.
 4. В работе не рассматривается влияние неоднородностей показателя преломления слоя по его толщине на регистрируемые спектры и рассчитываемые толщины слоёв.
 5. Текст диссертации не лишён опечаток. На странице 114 после ссылки на Рисунок 35а не хватает закрывающейся скобки.

Заключение

Указанные замечания не отражаются на общей положительной оценке диссертации. Работа выполнена на высоком уровне. Результаты работы полностью и своевременно опубликованы в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, прошли апробацию в виде докладов на многих конференциях. Содержание диссертации соответствует указанной специальности. Автореферат диссертации полно и верно отражает содержание работы.

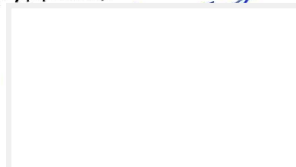
Диссертация Семёнова З.В. является законченной самостоятельной научно-квалификационной работой, в которой содержится новое решение важной научно-технической задачи создания системы контроля, способной контролировать процесс нанесения многослойных оптических покрытий с измерением толщины слоя и скорости его нанесения в реальном времени в процессе нанесения (*in situ*) в широком спектральном диапазоне. Разработанная система контроля рекомендуется к внедрению.

На основании изложенного считаем, что диссертация Семёнова Захара Владимировича удовлетворяет требованиям пункта 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» постановления Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г. (ред. От 02.08.2016), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.07 – «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы».

Отзыв ведущей организации на диссертацию Семёнова З.В. подготовлен и рассмотрен научным отделением НО-1 по итогам доклада соискателя на научном семинаре НО-1 совместно с НТО-7 и одобрен на заседании Научно-технического

совета отделения НО-1 совместно с НТО-7 АО «ГОИ им. С.И. Вавилова» 5 ноября 2019 года (Протокол № 18 от 5.11.2019 г.).

Учёный секретарь секции НТС АО «ГОИ им. С.И. Вавилова»
Начальник отдела-главный научный сотрудник,
Доктор физико-математических наук,
Профессор



Белоусова И.М.

Сведения об организации:

АО «Государственный Оптический Институт им. С.И. Вавилова»

199053, Санкт-Петербург, Кадетская линия В.О., д.5, корп. 2

Тел.: (812) 327-00-95

E-mail leader@soi.spb.ru

<http://www.npkgoi.ru/>

Отзыв получен 05.12.2019

А. Селезнев М. В.

с отзывом ознакомлен 06.12.2019

Сели Селезнев З. В.