

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Семенова Захара Владимировича «Исследование метода непрямого оптического контроля толщин многослойных покрытий в широком спектральном диапазоне», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности: 05.11.07 «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы»

История создания многослойных интерференционных оптических покрытий насчитывает уже несколько десятилетий, но и в настоящее время создаются новые методы для контроля параметров таких покрытий. Значительная проблема, возникающая при формировании интерференционного покрытия заданного дизайна – необходимость прецизионного контроля толщин слоев в составе покрытия. Развитие элементной базы оптоэлектроники, вычислительной техники и математических алгоритмов для решения обратных задач спектрофотометрии открывает новые возможности для решения указанной проблемы. В связи с этим, весьма **актуальной** является поставленная в диссертационной работе Семенова З.В. задача разработки и комплексного исследования метода контроля толщин многослойных покрытий непосредственно в процессе их формирования. В разработанном методе полноценно используются последние научно-технические достижения из перечисленных областей и, как следствие, появляется возможность работы в реальном времени. Спектрометр «Колибри-2» в составе разработанной системы контроля обеспечивает высокое быстродействие при записи спектров отражения, а эффективное программное обеспечение позволяет сразу же восстанавливать из этих спектров значения толщины слоев. Очень важно, что установка снабжена системой обратной связи, которая, при необходимости, позволяет корректировать процесс формирования покрытий. Усилия, затраченные на создание метода контроля, привели к отличным результатам: разработанная система во многом превзошла известные аналоги, а покрытия, полученные на ней, оказались очень высокого качества. Важным преимуществом предложенной системы контроля является возможность встраивания ее в действующие вакуумные установки для промышленного производства оптических покрытий, что может принести значительную экономическую пользу. Несомненно, что у созданной в рамках диссертационной работы Семенова З.В. методики имеется большой потенциал для дальнейшего развития.

Диссертация Семенова З.В. состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 125 наименований, 3 приложений. Объем текста диссертации составляет 157 страниц, в том числе 45 рисунков и 4 таблицы.

Литературный обзор (глава 1) содержит анализ источников по методам оптического и неоптического контроля нанесения многослойных покрытий. Основная цель литературного обзора, поставленная автором, – обоснование

выбора метода для контроля нанесения многослойных оптических покрытий. Эта цель достигнута путем сопоставления существующих решений для контроля процессов нанесения многослойных покрытий и анализа их возможностей, достоинств и недостатков. В результате, автор сделал выбор в пользу непрямого оптического контроля как эффективного метода повышения точности при измерении толщин слоёв.

Личный вклад автора состоит в постановке и решении задачи 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 которого проведено моделирование и обработка полученных данных. Этому посвящена глава 2. На основании результатов исследования автором предложены способы снижения погрешностей измерения толщины наносимого слоя при использовании метода непрямого оптического контроля в вакуумных установках. Один из таких способов, а именно методика контроля с предварительно нанесённым слоем, запатентован с участием соискателя. Его подробное описание содержится в главе 3. Тщательная проработка характеристик системы контроля и практические рекомендации, сформулированные по результатам такой проработки, по-видимому, должны быть признаны наиболее существенным достижением диссертанта. Кроме того, при непосредственном участии автора создано, испытано и внедрено техническое решение системы контроля, выполнены синтезы реальных оптических структур и проведено их исследование. Схема созданной системы контроля и характеристики полученных на ней спектральных фильтров представлены в главе 4.

В итоге, соискатель получил **новые и оригинальные результаты**:

1. Компьютерная модель системы непрямого широкополосного контроля, которая позволяет исследовать совокупное действие сразу нескольких факторов, влияющих на погрешность определения толщины: шумов линейки фотодиодов, спектрального диапазона контроля, количества фотодетекторов, погрешности градуировки спектрометра по длинам волн, дрейфа интенсивности источника излучения и погрешности показателей преломления наносимых материалов.

2. Влияние характеристик элементов созданной системы контроля на погрешности измерения толщин слоёв. Определены характерные диапазоны толщин, внутри которых лишь один или два из рассмотренных факторов имеют преимущественное влияние. В результате установлены диапазоны толщин слоев SiO_2 и TiO_2 , при которых погрешность определения толщины минимальна.

3. Метод контроля многослойных покрытий с предварительно нанесённым слоем (слоями), который позволяет в 2–3 раза уменьшить погрешности измерения для тонких стартовых слоёв с толщинами менее 100 – 250 нм (в зависимости от материала).

4. 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. Предложенное решение экспериментально апробировано при получении нескольких сотен реальных многослойных покрытий.

Особо следует отметить создание диссертантом программного обеспечения «LayerControl», которое поддерживает большой набор функций, необходимых для правильной работы системы контроля. Среди этих функций калибровка системы по калибровочной подложке с известным коэффициентом отражения, расчёт текущей толщины наносимого слоя и разницы с проектной толщиной, сигнализация оператору о завершении нанесения слоя и многие другие.

Практическая значимость диссертации заключается в разработке Семеновым З.В. общей математической модели, описывающей влияние множества факторов на погрешности измерения толщины, и в разработке системы контроля, на которой успешно изготовлены многослойные интерференционные покрытия – просветляющие покрытия, дихроичные и широкополосные зеркала, в том числе, для ИК-диапазона, и другие. Очень важно, что полученные покрытия не уступают по характеристикам фильтрам, производимым с помощью отечественных и иностранных вакуумных установок. На значительную практическую ценность работы указывают также полученные автором патент РФ, акты внедрения и свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Обоснованность результатов диссертации обеспечивается использованием современных средств и методик, достаточным объемом полученных теоретических и экспериментальных результатов, глубиной их проработки и сопоставлением с имеющимися литературными данными. Результаты работы подтверждены положительным опытом применения созданной системы контроля в составе вакуумной установки «ВУ 2М» Института лазерной физики СО РАН (г. Новосибирск) и высоким качеством спектральных фильтров, получаемых с её помощью. Результаты диссертационной работы Семенова З.В. опубликованы в 11 научных работах, в том числе, в трёх журналах, входящих в список ВАК, и апробированы на ряде отечественных конференций.

В **автореферате** сформулированы цели и задачи работы, обоснованы актуальность и новизна проведенных исследований. Он имеет достаточное количество пояснений, рисунков и графиков, необходимых для общего представления о работе. Основные положения, выносимые автором на защиту, не вызывают возражений. Автореферат в полной степени соответствует содержанию диссертации.

В качестве **замечаний** необходимо отметить следующее:

1. Моделирование в диссертации проводится для установления погрешности только толщины, но непосредственно измеряется коэффициент отражения R . В таком случае лучше было бы отслеживать погрешности R , а погрешность толщины рассчитать путем решения обратных задач в

приближении идеальных моделей «пленка-подложка». Эта работа дала бы нижнюю оценку для величины погрешности толщины. Реальная погрешность будет выше в связи с неустраняемым и трудно формализуемым фактором, называемым «ошибка выбора модели». Отклонений от идеальной модели очень много (шероховатость, остаточная анизотропия, клиновидность, механические напряжения и пр.) и в общем случае невозможно учесть их все. Полагаю, что именно погрешность R является наиболее значимой, фундаментальной метрологической характеристикой спектрофотометрической системы, а погрешность толщины вторична.

2. Критерий, согласно которому погрешность физической толщины не должна превышать 0,2 нм (п. 2.4 и рис 20 в диссертации, рис. 3 в автореферате), задан несколько искусственно. В диссертации указано, что общая погрешность всей системы контроля находится на уровне 1 нм. Эта величина получена путем сопоставления экспериментальных спектров отражения готовых покрытий с рассчитанными по программе «OptiLayer» и ей можно доверять. В связи с этим, возникает вопрос: критическим ли будет ухудшение качества покрытий, если перейти к допустимой погрешности на уровне 0,4 нм, то есть охватить весь диапазон исследованных толщин (до 5000 нм)? Этот вопрос важен из-за возможных технических и экономических трудностей при переходе к частой смене контрольных подложек, так как при этом потребуются более сложные вакуумные системы, более сложные алгоритмы изготовления покрытий и большое число контрольных подложек с предварительно нанесенным слоем.

3. Пункты 2.1 и 2.2 по своему содержанию составляют завершающую часть литературного обзора, но размещены в основной части.

4. Замечания редакционно-технического характера. Первое, в тексте имеются грамматические ошибки, связанные с неправильным согласованием слов в предложениях. Второе, в ссылках номера источников перечислены через точку с запятой, причем перечисляются все источники, следующие друг за другом. Это несколько отличается от сложившихся стандартов оформления научных текстов. Например, на стр. 6 вместо [33; 34; 35; 36; 37; 38; 39; 40; 41; 42; 43] нужно писать [33-43].

Указанные замечания не касаются основных выводов и положений, выносимых на защиту, и не снижают общей положительной оценки диссертационной работы, выполненной на высоком научно-техническом уровне. В диссертации Семенова З.В. решена научно-техническая задача разработки эффективной системы контроля толщины слоев в процессах формирования многослойных оптических покрытий. Существенно, что полученные с использованием разработанной системы покрытия не уступают, а в ряде случаев превосходят характеристики фильтров, выпускаемых отечественной и зарубежной промышленностью. Таким образом, цель данной диссертации полностью достигнута. По объему выполненных исследований, научному уровню и новизне, научной и практической значимости полученных результатов диссертация является законченной научно-квалификационной работой и

соответствует специальности ВАК 05.11.07 «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы».

Результаты исследований Семенова З.В. могут быть использованы в Институте лазерной физики СО РАН, Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, АО «Новосибирский приборостроительный завод», АО "НПЦ "Полюс", на других предприятиях оптической промышленности.

Диссертационная работа Семенова Захара Владимировича «Исследование метода непрямого оптического контроля толщин многослойных покрытий в широком спектральном диапазоне» соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор – Семенов Захар Владимирович – заслуживает присвоения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.07 «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы».

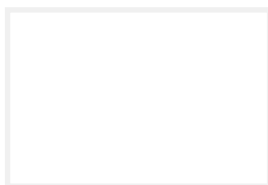
Шаяпов Владимир Равильевич

Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории функциональных пленок и покрытий ФГБУН Института неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН.

630090, г. Новосибирск, Проспект Академика Лаврентьева Лаврентьева, 3.

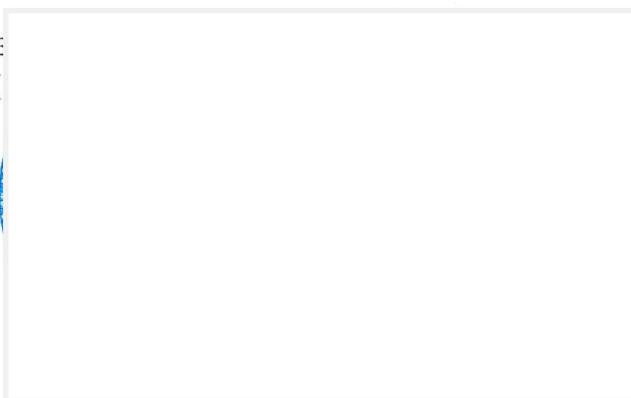
Тел.: +7(383)330-94-10

e-mail: shayapov@niic.nsc.ru



Шаяпов Владимир Равильевич

Подпись В.Р. Шаяпова
Ученый секретарь ИНХ
д.х.н.



Герасько О.А.

Отзыв получен 06.12.2019 *Александр М.А.*
С отзывом ознакомлен 09.12.2019 *Семенин З.В.* 5