

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.173.08 НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
МИНОБРНАУКИ РФ ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от «24» декабря 2019 г, протокол № 1

О присуждении Семенову Захару Владимировичу, гражданину РФ, учёной степени кандидата технических наук.

Диссертация «Исследование метода непрямого оптического контроля толщин многослойных покрытий в широком спектральном диапазоне» по специальности «05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы» принята к защите «22» октября 2019 г., протокол № 2, диссертационным советом на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», Минобрнауки РФ, 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, приказ о создании совета № 105/нк от 11.04.2012 г.

Соискатель Семенов Захар Владимирович 1985 года рождения, в 2010 году окончил магистратуру Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Новосибирский государственный университет» по направлению «Физика» на кафедре «Квантовая оптика». В 2013 году завершил обучение в аспирантуре Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт автоматизации и Электрометрии» Сибирского отделения Российской академии наук, где в настоящее время работает младшим научным сотрудником.

Диссертация выполнена в лаборатории оптических информационных систем в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт

автоматики и ЭлектрOMETрии» Сибирского отделения Российской академии наук, Минобрнауки РФ.

Научный руководитель — доктор технических наук Лабусов Владимир Александрович, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», кафедра Оптических информационных технологий.

Официальные оппоненты:

Чугуй Юрий Васильевич, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Конструкторско-технологический институт научного приборостроения Сибирского отделения Российской академии наук, дирекция, научный руководитель Института;

Шаяпов Владимир Равильевич, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт неорганической химии им. А.В. Николаева Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория функциональных плёнок и покрытий, старший научный сотрудник

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация — Акционерное общество «Государственный оптический институт имени С.И. Вавилова», г. Санкт-Петербург **в своём положительном заключении**, подписанном доктором физико-математических наук, профессором, начальником отдела, главным научным сотрудником Белоусовой И.М. и утверждённом ВрИО директора по научной работе и инновациям Архиповой Л.Н., указала, что диссертация Семенова Захара Владимировича «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 Семенова 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. Диссертация Семенова З.В. удовлетворяет требованиям пункта 9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней» постановления Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г. (ред от 02.08.2016), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы».

Соискатель имеет 25 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 11 работ, из них в рецензируемых научных изданиях – 4 работы, в том числе 3 работы опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК РФ; 2 работы в изданиях, входящих в международные библиографические системы Scopus и Web of Science; 1 патент РФ на изобретение и 2 свидетельства на программы для ЭВМ. Из 11 опубликованных работ Семенова З.В. 8 работ опубликованы в соавторстве. В работах, опубликованных в соавторстве соискатель внёс существенный вклад, не менее 70%. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем учёной степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

Наиболее значимые работы по теме диссертации:

1. Семенов, З. В. Исследование погрешностей непрямого способа спектрального контроля толщин слоёв многослойных оптических покрытий путём компьютерного моделирования / З. В. Семенов, В. А. Лабусов // Автометрия 53, № 6. – 2017. – С. 3-14.

2. Лабусов, В. А. Система спектрального контроля нанесения многослойных диэлектрических покрытий / В. А. Лабусов, З. В. Семенов, И. А. Зарубин, М. С. Саушкин, Г. В. Эрг, С. И. Ковалёв // Измерительная техника №12. – 2013. – С. 11-14.

3. Семенов, З. В. Применение многослойных диэлектрических покрытий для подавления излучения нерабочих порядков спектра в спектрометрах с дифракционной решёткой / З. В. Семенов, В. А. Лабусов, И. А. Зарубин, Г. В. Эрг // Заводская лаборатория. Диагностика материалов 83, №. 1-2. – 2017. – С. 117-122.

4. Семенов, З. В. Система спектрального контроля нанесения многослойных оптических покрытий в широком спектральном диапазоне / З. В. Семенов, В. А. Лабусов, И. А. Зарубин // Интерэкспо Гео-Сибирь Т. 5, №2. – 2018. – С. 179-191.

5. Способ измерения толщин нанометровых слоёв многослойного покрытия, проводимого в процессе его напыления: пат. 2527670 Российская Федерация / В. А. Лабусов, Г. В. Эрг, З. В. Семенов – международная заявка РСТ № RU 2012/000001; заявл. 10.01.2012; опубл. 10.09.2014.

На диссертацию и автореферат поступило 12 отзывов, из них 11 положительных, 1 отрицательный:

1. Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва. Научный руководитель НИВЦ МГУ, д.ф.-м.н., профессор Тихонравов Александр Владимирович. Отзыв положительный. *Без замечаний.*

2. АО «НИИ Полнос» им. М.Ф. Стельмаха, г. Москва. Начальник отдела, к.ф.-м.н., доцент Азарова Валентина Васильевна. Отзыв положительный. *Замечание:* Из приведённых в автореферате полученных превосходных результатов никак не следует степень их повторяемости и воспроизводимости.

3. АО НПО Государственный институт прикладной оптики (ГИПО), г. Казань. Научный руководитель отдела технологии оптических покрытий, главный научный сотрудник, д.т.н., профессор Гайнутдинов Ильдус Салыхович. Отзыв положительный. *Замечания:* 1. В автореферате недостаточно отражены ограничения

метода непрямого оптического контроля. Например, при нанесении узкополосных фильтров целесообразней использовать сквозной контроль, при котором систематические погрешности толщин слоёв компенсируются в процессе напыления. Также было бы полезно исследование влияние на точность измерения толщин неоднородности показателей преломления плёнкообразующих материалов. 2. Вызывает сомнение правомерность применения предлагаемой модели для практической оценки погрешности толщин тонких слоёв. При толщинах слоёв до 10-20 нм (в зависимости от плёнкообразующего материала и условий осаждения) плёнка по своей структуре ещё не является сплошной. Поэтому говорить о погрешностях измерения толщин таких плёнок без учёта её структуры неверно. Кроме того, заявленные погрешности (0,2 нм и менее) сопоставимы с размерами молекул паров осаждаемых плёнкообразующих материалов, что также вызывает сомнения в практической применимости модели. 3. Применительно к оптическим покрытиям общепринято использовать термин «фильтр» для описания конкретного типа покрытий (узкополосный фильтр, блокирующий фильтр и т. п.). Использование автором термина «фильтр» как обобщающего понятия для всех типов покрытий (с.с.3, 5, 7, 9, 17 автореферата) в контексте представленной работы представляется некорректным.

4. АО «Красногорский завод им. С.А. Зверева», г. Красногорск. Главный оптик – начальник оптического технологического отдела, д.т.н. Сенник Богдан Николаевич. Отзыв положительный. *Замечания:* 1. Использование многомодового оптоволоконного влияет на поляризацию проходящего через него излучения, что ставит вопрос о влиянии поляризации в использованной системе, который не отражён в автореферате. 2. Теоретическая часть исследования была проведена для двух материалов TiO_2 и SiO_2 , но остаётся вопрос о применимости данного подхода и результатов для иных диэлектрических материалов. Кроме того даже выбранные на практике обладают несколько различными дисперсионными характеристиками показателя преломления в зависимости от условий нанесения в вакуумной камере. 3.

Из автореферата остаётся непонятен выбор подложки LASF-01 для материала SiO_2 , в то время как для TiO_2 использовалась широко применяемая подложка ВК7.

5. АО «Лыткаринский завод оптического стекла», г. Лыткарино (Московская Обл.). Ведущий инженер-технолог, к.т.н. Семенов Александр Павлович. Отзыв положительный. *Замечания:* 1. Из автореферата остаётся непонятным, учитывается ли неоднородность показателей преломления осаждаемых материалов на самой вакуумной установке с системой контроля, ведь контроль скорости нанесения осуществляется для снижения данной неоднородности. 2. В автореферате нет информации об недостатках и ограничениях выбранных методов контроля.

6. Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения», г. Москва. Ведущий научный сотрудник, д.т.н., профессор Бажанов Юрий Вадимович. Отзыв положительный. *Замечания:* 1. Отсутствуют оценки по минимальному измеряемому системой приращению толщины наносимого слоя в случае использования более современной вакуумной установки. 2. В итоговой таблице отсутствует сравнение с отечественными изготовителями тонкоплёночных покрытий.

7. ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений» (ВНИИОФИ), г. Москва. Начальник научно-исследовательской «Лаборатории измерений оптических постоянных веществ», д.т.н., профессор Вишняков Геннадий Николаевич. Отзыв положительный. *Замечания:* 1. В список исследуемых факторов, определяющих минимальный уровень погрешностей измерения толщин слоёв, можно было добавить нелинейность сигнала в регистрируемых спектрах. 2. В автореферате ничего не сказано о метрологическом обеспечении созданной системы широкополосного контроля.

8. Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева-КАИ, г. Казань. Профессор кафедры оптико-электронных систем, д.т.н., профессор Павлычева Надежда Константиновна. Отзыв положительный.

Замечание: автор не упоминает работ ОА «НПО ГИПО», которое является одной из ведущих организаций РФ по оптическим покрытиям.

9. ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (СГУГиТ), г. Новосибирск. Профессор кафедры фотоники и приборостроения, к.т.н., профессор Хацевич Татьяна Николаевна и доцент кафедры фотоники и приборостроения, к.т.н. Чайка Надежда Федоровна. Отзыв положительный. *Замечания и вопросы:* 1. На с.11 автореферата указано, что в качестве подложек использовались две марки стекла: BK7 и LASF01. Если BK7 является одной из распространенных марок из каталога Schott, то LASF01 является устаревшей маркой каталога NIKARI, Япония. Поэтому выбор марки LASF01 представляется необоснованным или марка обладает какими-то специфическими особенностями, которые отсутствуют у распространенных марок-аналогов тяжелых и сверхтяжелых флинтов? 2. По просветляющему покрытию, приведенному на рисунке 8: для того, чтобы оценить полученные результаты, необходимо проанализировать не только абсолютные значения, но и их отклонение ΔR от расчетных значений для рабочего спектрального диапазона. В оптической системе конкретного оптического прибора используются марки материалов, отличающиеся показателями преломления и дисперсией. Так, в ПО525 разброс показателей преломления линз составляет примерно 0,4. Однако, судя по тексту автореферата и диссертации, речь идет об одном дизайне покрытия для всех линз изделия. В связи с этим возникают вопросы: каким образом осуществлялась адаптация этого дизайна при нанесении покрытия на линзы из различных марок стекла: в реальном масштабе времени при напылении? Или осуществлялся предварительный пересчет толщин слоёв для каждой марки стекла? Требуется ли менять материал контрольных подложек при просветлении лиз из различных материалов?

10. ФГБУН Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН (ИПМех РАН), г. Москва. Ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н. Якимов Михаил Юрьевич. Отзыв положительный. *Замечание:* автором неоднократно употребляется понятие

«апробация (в автореферате написано «апробирование» вместо правильного «апробация»), означающее проверку, признание и одобрение полученных результатов сообществом специалистов, в неправильном значении «практическая проверка» или «экспериментальное подтверждение».

11. ФГБУН Институт лазерной физики СО РАН (ИЛФ СО РАН), г. Новосибирск. Старший научный сотрудник, к.ф.-м.н. Бельтюгов Владимир Николаевич. Отзыв положительный. *Без замечаний.*

12. ФГБУН Институт физики полупроводников имени А. В. Ржанова СО РАН (ИФП СО РАН), г. Новосибирск. Старший научный сотрудник, к.х.н. Алиев Владимир Шакирович. Отзыв отрицательный. *Замечания:* 1. Метод непрямого широкополосного контроля – это по сути, оптический метод измерения скорости осаждения и толщины осаждённого слоя на контрольной подложке и никак не связан со спектральными характеристиками осаждаемого многослойного оптического покрытия на рабочей подложке. В этом заключается его преимущество и основной недостаток. Преимущество в том, что точность нанесения слоя не зависит от дизайна оптического покрытия. Недостаток – оптический спектр покрытия не измеряется, а вычисляется из измеренных толщин нанесённых слоёв. Возникает вопрос: насколько точно можно восстановить реальный оптический спектр покрытия по измеренным оптическим методом толщинам слоёв? Семенов З.В. в диссертационной работе утверждает, что это можно сделать очень точно. Однако результаты, представленные в автореферате, не достаточно убедительны для такого утверждения, хотя ответ на этот вопрос является принципиально важным для метода непрямого широкополосного контроля, т.к. практической ценностью является оптический спектр покрытия, а не дизайн, с помощью которого достигнуты спектральные характеристики. 2. На рисунке 3 автореферата обсуждаются расчётные зависимости систематических погрешностей измерения толщины слоя методом непрямого контроля от толщины слоя материалов SiO_2 и TiO_2 . При этом показана случайная погрешность, например для SiO_2 около 0,03нм. (Для сравнения, длина

связи Si-O в кварце равна 0,162нм). Очевидно, реальные плёнки имеют шероховатость и неоднородность по толщине существенно превышающие указанные величины. Для того чтобы данные с контрольной подложки можно было использовать для контроля толщин на рабочей подложке, эти параметры - шероховатость и неоднородность слоёв должны совпадать на обеих подложках с точностью меньше 0,1нм. Однако это практически сложно сделать, учитывая такие факторы самого процесса напыления, как ассистирование, паразитное подпыление и неоднородность диаграммы потока частиц от источников материала. Но в этом заключается научно-техническая задача любого (не только оптического) непрямого контроля толщин многослойных покрытий. Но в работе (автореферате) этот вопрос не обсуждается. Кроме этого, не обсуждается как решается проблема гетерограниц между слоями в покрытии, ведь в оптической схеме расчёт толщины слоя на контрольной подложке гетерограницы отсутствуют. Если эти вопросы не выяснены тогда зачем добиваться такой точности, выбирать оптимальные толщины материалов SiO₂ и TiO₂?. Конечно, измерить оптическую толщину прозрачной плёнки на контрольной подложке, усреднённой по диаметру пятна 6мм с точностью 0,02 нм, имея в руках хороший спектрофотометр, вполне реально. Но это не та проблема, которая важна для непрямого контроля толщин многослойных покрытий. 3. На первый взгляд наиболее сильной частью диссертационной работы является практическая реализация метода непрямого оптического контроля. Экспериментальные примеры нанесения конкретных оптических покрытий могли бы закрыть многие вопросы, перечисленные выше. Однако в автореферате явно не хватает экспериментальных результатов подтверждающих качество данного метода. Приведён всего лишь один спектр AR-фильтра, который можно выбрать из 10 неудачных спектров. Подтверждением эффективности метода является совокупность нескольких спектров покрытий с одним и тем же дизайном, но нанесённых независимо в различных технологических загрузках. В этом случае было бы возможно по воспроизводимости спектра оценить реальную точность и эффективность метода. 4. Есть вопросы к положениям, выносимым на защиту. «1.

Компьютерная модель ... позволяет оценивать минимальный уровень случайных и систематических погрешностей контроля.» - не является положением, выносимым на защиту, а является тривиальным утверждением, не требующим ни экспериментального, ни теоретического обоснования, т.к. не содержит количественных параметров. Остальные положения скорее относятся к задаче достижения предельной точности определения толщины слоя на контрольной подложке, а не к задаче непрямого контроля нанесения многослойных покрытий.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается близостью решаемых ими научных задач к тематике диссертационной работы Семенова З.В., их широкой известностью и достижениями в области исследования и создания тонкоплёночных покрытий, наличием публикаций в соответствующей области исследования и способностью определить практическую ценность диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана компьютерная модель системы непрямого широкополосного контроля, которая позволяет исследовать влияние характеристик её основных элементов на уровень случайных и систематических погрешностей измерения толщин слоёв;

проведено исследование влияния характеристик основных элементов системы непрямого широкополосного контроля (линейки фотодетекторов, спектрометра и источника излучения) на точность контроля и определены оптимальные толщины слоя, при которых достигаются наименьшие погрешности измерения;

предложен новый метод контроля многослойных покрытий, основанный на применении предварительно нанесённого слоя, который позволяет в 2 – 5 раз уменьшить погрешность измерения для стартовых слоёв с толщинами существенно меньшими длин волн контроля;

разработана система контроля, **создан и внедрён** экспериментальный образец этой системы, позволяющей вести непрямой 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.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

изложены новые данные, вносящие вклад в расширение представлений о методах широкополосного непрямого контроля с решением в реальном времени обратных задач;

изучено 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 погрешности измерения толщин наносимых слоёв;

раскрыта проблема широкополосного контроля толщин более тонких по сравнению с длинами волн контроля слоёв, которые находятся первыми на контрольных подложках и **предложено** её решение;

доказано существование диапазона толщин слоёв на контрольной подложке, которые позволяют получить минимальную погрешность измерения при использовании метода непрямого широкополосного контроля с решением обратных задач.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

представлены практические рекомендации для снижения случайных и систематических погрешностей измерения толщин наносимых слоёв при использовании метода непрямого широкополосного контроля;

представлен новый метод непрямого спектрального контроля по дополнительным контрольным подложкам, содержащим вспомогательный предварительно нанесённый слой, который позволяет измерять толщины тонких стартовых слоёв покрытия с погрешностью, не превышающей погрешности измерения последующих слоёв покрытия;

определены перспективы практического применения метода широкополосного контроля с решением в реальном времени обратных задач для поддержания постоянства скорости нанесения материала путём изменения мощности испарителя вакуумной установки с целью повышения однородности получаемых плёнок;

разработан экспериментальный образец системы контроля, позволяющей проводить прямой и 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;

разработанная система внедрена в Институте лазерной физики (ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск) введением в состав вакуумной установки «ВУ-2М», на которой изготовлены такие виды многослойных оптических покрытий, как просветляющие покрытия, дихроичные и широкополосные зеркала и другие.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

идеи базируются на анализе практики применения различных видов оптического контроля в научной литературе и лучших зарубежных решениях систем контроля;

экспериментальные результаты получены на современном оборудовании с современными методиками регистрации, сбора и обработки данных, с достаточным объёмом полученных теоретических и экспериментальных воспроизводимых результатов;

теория построена на известных, проверяемых данных и согласуется с опубликованными экспериментальными данными, представленными в независимых источниках;

проведено сравнение характеристик созданного экспериментального образца системы контроля с лучшими решениями систем широкополосного и монохроматического контроля, предлагаемыми известными мировыми производителями.

В результате исследований получены: патент на изобретение РФ № 2527670, 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ (№2015661646, №2016612869).

Личный вклад соискателя состоит в постановке задачи определения влияния характеристик элементов системы контроля и параметров нанесения на погрешности измерения толщин слоёв. Для решения данной задачи автором предложена компьютерная модель системы контроля и разработано программное обеспечение, с помощью которых проведено исследование влияния характеристик элементов системы непрямого широкополосного контроля на погрешности измерения толщин слоёв. На основании результатов исследования автором предложены способы снижения погрешностей измерения толщины наносимого слоя при использовании метода непрямого оптического контроля в вакуумных установках. При непосредственном участии автора создан, испытан и внедрён экспериментальный образец системы контроля. Также автором осуществлены обработка и интерпретация экспериментальных данных, подготовка основных публикаций по выполненной работе. Представленные в диссертации основные результаты получены соискателем лично. В работах, опубликованных в соавторстве соискатель внёс существенный вклад, не менее 70%.

Диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, в которой изложены новые научно-обоснованные результаты, имеющие существенное

значение для развития систем широкополосного непрямого контроля нанесения многослойных покрытий. Диссертация соответствует пунктам 9-14 Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842.

На заседании 24 декабря 2019 г. диссертационный совет принял решение присудить Семенову Захару Владимировичу учёную степень кандидата технических наук по специальности 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 5 докторов наук по специальности 05.11.07, участвовавших в заседании, из 22 человек, входящих в состав совета, дополнительно введённых на разовую защиту нет, проголосовали: за – 16, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель диссертационного совета

А.Г. Вострецов

Учёный секретарь диссертационного совета

М.А. Степанов

24 декабря 2019 г.