



УТВЕРЖДАЮ
Ректор учреждения образования
«Гомельский государственный
университет имени Ф. Скорины»
С.А. Хахомов
«_____» _____ 2025 г.

ВЫПИСКА

из протокола № 1

заседания расширенного научного семинара кафедры оптики
учреждения образования
«Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины»
от 10.01.2025 г.

Присутствовало 22 человека, в том числе 5 докторов наук, 10 кандидатов наук: д.т.н. Гольдаде В.А., д.т.н. Пилипцов Д.Г., д.ф.-м.н., член-корр. НАН Беларуси Сердюков А.Н., д.т.н. Ярмоленко М.А., д.х.н., член-корр. НАН Беларуси Рогачев А.В., к.ф.-м.н. Гайшун В.Е., к.ф.-м.н. Годлевская А.Н., к.ф.-м.н. Гришечкин Ю.А., к.ф.-м.н. Капшай В.Н., к.т.н. Руденков А.С., к.ф.-м.н. Самофалов А.Л., к.ф.-м.н. Семченко А.В., к.т.н. Соколов С.И., к.т.н. Федосенко Н.Н., к.ф.-м.н. Шамина А.А., старший преподаватель Середа А.А., аспирант Павленко А.В., магистранты Головин Е.Д., Гурченко Л.А., Дубовская В.А., Филипченко К.И., Фролов С.А.
Председатель семинара – к.ф.-м.н. А.Л. Самофалов, секретарь семинара – к.ф.-м.н. А.Н. Годлевская.

ПОВЕСТКА ДНЯ:

Обсуждение диссертационной работы преподавателя-стажёра кафедры физики и компьютерных технологий учреждения образования «Могилёвский государственный университет имени А. А. Кулешова» Чудакова Евгения Александровича «Новые методы оптической диагностики тонких пленок», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – «Оптика».

Слушали: научный доклад Чудакова Евгения Александровича по теме диссертации, в котором сформулирована цель, задачи, указаны предмет и объект исследования; обоснована актуальность темы исследования; изложено краткое содержание и ключевые результаты диссертационной работы; сформулированы выводы и положения, выносимые на защиту; охарактеризована научная новизна и практическая значимость результатов исследования, а также предоставлены сведения об их апробации.

При обсуждении доклада соискателю было задано 17 вопросов, на которые им даны обстоятельные ответы. Вопросы заданы Годлевской А.Н., Рогачевым А.В., Павленко А.В., Федосенко Н.Н., Гольдаде В.А.

Выступили: Шамына А.А. – эксперт оппонировающей организации, Рогачёв А.В., Гольдаде В.А., Сердюков А.Н., Федосенко Н.Н., Капшай В.Н., Годлевская А.Н., которые в своих выступлениях дали положительную оценку диссертационной работе.

По итогам обсуждения диссертационной работы Е. А. Чудакова «Новые методы оптической диагностики тонких пленок» единогласно принято следующее заключение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

о диссертации Е. А. Чудакова «Новые методы оптической диагностики тонких пленок», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – оптика

1. Соответствие содержания диссертации заявленной специальности и отрасли науки

Содержание диссертационной работы Е.А. Чудакова соответствует паспорту специальности 01.04.05 – «Оптика», так как в ней представлены результаты исследований по следующим направлениям оптической науки:

1. Волновая и квантовая оптика. Интерференция и дифракция. Интерферометрия и эллипсометрия.

В диссертации методы волновой оптики и спектральной эллипсометрии широко используются для анализа оптических свойств тонких пленок. Закономерности распространения электромагнитного излучения в плоскостных средах, содержащих различное количество слоев из прозрачных и/или поглощающих оптических материалов, рассматриваются соискателем с учётом интерференционного взаимодействия электромагнитных волн.

2. Металлооптика. Оптические волноводы. Оптика рассеивающих сред.

В диссертационной работе исследовано взаимодействие лазерного излучения с металлическими плёнками, построена теоретическая модель аномального скин-эффекта, проявляющегося в металлических плёнках, нанесённых на диэлектрическую подложку, и на основе модели бесконтактной волноводной спектроскопии предложены методы повышения чувствительности оптических сенсоров водорода и аммиака. В тексте диссертации описаны также особенности рассеяния лазерных пучков на неоднородных планарных структурах, в том числе состоящих из наноразмерных слоёв.

3. Разработка основ новых технологий диагностики природных и техногенных объектов и процессов. Методы оптических и спектральных измерений.

В диссертации рассмотрены оптические и волноводные эффекты, проявляющиеся при распространении электромагнитного излучения в тонкоплёночных структурах, на основе которых могут быть разработаны новые технологии диагностики оптических свойств материалов и производства сенсоров для контроля химического состава различных сред.

В диссертации содержится теоретическое и экспериментальное обоснование новых методов бесконтактной волноводной спектроскопии, предназначенных для измерения таких параметров тонкоплёночных структур как толщина и показатель преломления, произведена оценка эффективности и преимуществ предложенных методов в сравнении ранее известными методами.

Полученные в диссертации результаты опубликованы в 7 статьях в научных журналах физико-математического профиля, включенных в перечень ВАК Республики Беларусь, а также прошли апробацию на 21 научной конференции различного уровня: международной, республиканской и др.

Содержание диссертации соответствует теме исследования, паспорту заявленной специальности 01.04.05 – «Оптика» и отрасли физико-математических наук. Оно правильно отображено в автореферате.

2. Научный вклад соискателя в решение научной задачи с оценкой его значимости

Соискатель разработал теоретическую модель бесконтактной волноводной спектроскопии тонких пленок, в которой обеспечена возможность точных измерений оптических характеристик наноразмерных структур без необходимости физического контакта зондирующего устройства с образцом. Модель основана на результатах анализа условий возбуждения m -линий, возникающих в распределении интенсивности волнового поля, регистрируемого в плоскости матрицы фотоприемников, при взаимодействии лазерного излучения с тонкими пленками и многослойными структурами. Для повышения точности моделирования автором диссертации использован метод перевала. Эффективность разработанной модели подтверждена соискателем при экспериментальном определении оптических параметров тонкоплёночных структур: показателя преломления и толщины плёнок.

Автор диссертации произвел детальный анализ условий возбуждения мод Ценнека в двухслойных структурах «оксид кремния – палладий». Им были определены сочетания параметров, таких как длина волны, угол падения и состояние поляризации, при которых достигается наибольшая эффективность возбуждения мод Ценнека, а также разработаны критерии, при соблюдении которых на основе мод Ценнека возможно формирование сенсорных структур, обладающих высокой чувствительностью к изменениям свойств окружающей среды. Значимость указанных результатов состоит в возможности их применения для разработки высокочувствительных оптических сенсоров.

В диссертационной работе математически строго выведены соотношения взаимности для изотропных слоистых сред; с учетом соотношений вза-

имности описаны закономерности взаимодействия электромагнитного излучения с многослойными структурами. Соискатель аналитически обосновал неизменность значений коэффициентов отражения и коэффициентов пропускания при обращении направления распространения излучения через слоистую структуру, с обеих сторон граничащую с одинаковой оптически прозрачной средой; установил критерии, при которых достигается минимальное отражение и максимальное пропускание света многослойной структурой, и доказал применимость полученных соотношений для оптимизации параметров антибликовых покрытий и поглотителей солнечного излучения. Полученные в диссертации соотношения взаимности могут быть использованы при проектировании оптических покрытий с заданными характеристиками для микроэлектроники и солнечной энергетики.

Соискателем разработана модель аномального скин-эффекта, и на её основе описано взаимодействие оптического излучения с металлическими пленками наноразмерной толщины. В модели учтена вероятность зеркального и диффузного отражения электронов от границ пленки. Посредством анализа распределения оптических полей внутри металлической плёнки, формируемых при различных параметрах падающего излучения, исследовано влияние толщины плёнки на проявление аномального скин-эффекта. Разработанная автором модель аномального скин-эффекта проверена посредством обработки экспериментальных данных, известных из работ других авторов, пользовавшихся менее точной моделью нормального скин-эффекта при определении спектра диэлектрической проницаемости золотых плёнок различной толщины. Полученные результаты могут быть использованы для объяснения аномалий в поведении оптических характеристик тонких металлических плёнок при различных условиях освещения, что имеет большое значение при решении задач оптимизации характеристик оптических покрытий, создания сенсорных элементов и повышения качества эллипсометрических методов анализа тонкоплёночных структур.

Соискателем предложены алгоритмы обработки данных спектроскопических измерений, основанные на интегральных уравнениях Фредгольма второго рода, и произведена оценка их стабильности и точности применительно к различным модельным тонкоплёночным структурам. Использование этих алгоритмов для восстановления оптических характеристик пленок на основе экспериментальных данных обусловило повышение чувствительности методов диагностики. Разработанные соискателем алгоритмы могут иметь значение для специалистов, занимающихся разработкой программных комплексов, предназначенных для автоматизированного анализа оптических характеристик тонких пленок.

Автор диссертации произвел детальный анализ существующих моделей и методов диагностики тонких пленок, выявив их недостатки и ограничения на практическое применение. Соискателю удалось определить области применимости известных методов и устранить неточности в описаниях аномального скин-эффекта, допущенные в работах, ранее опубликованных другими авторами. С учётом этой новой информации соискателем предложены

доработки и методические усовершенствования, способствующие повышению точности измерений.

Материал диссертации систематизирован, логически структурирован и изложен на высоком научном уровне. Результаты работы подтверждены в экспериментальных исследованиях и соответствуют тем, которые предсказаны на основе теоретических моделей. В тексте чётко выделен личный вклад соискателя. В диссертационной работе имеются необходимые ссылки на все опубликованные соискателем статьи и иные материалы, содержащие представленные к защите результаты и включенные в перечень авторских работ, а также на все работы, перечисленные в библиографическом списке использованных источников.

Принимая во внимание описанные выше факты, можно заключить, что результаты, полученные соискателем, обладают высокой научной значимостью для развития методов диагностики тонкопленочных структур с использованием оптических бесконтактных методов, моделирования электромагнитных явлений в тонкопленочных структурах и технологий разработки сенсоров.

3. Замечания

1) Положения, вынесенные на защиту, сформулированы недостаточно ясно и имеют слишком общие термины:

– в первом защищаемом положении следовало сделать больший акцент на преимуществах и новизне разработанного диссертантом метода бесконтактной волноводной спектроскопии по сравнению с уже существующими методами, а также использовать термины, более точные, чем «стабильность измерений» и «локальный контроль параметров плёнок»;

– во втором защищаемом положении не хватает уточнения, что речь идёт о плоских электромагнитных волнах, и используется не конкретизированный термин «пространственный профиль комплексной диэлектрической проницаемости»;

– в третьем защищаемом положении не ясно, какие именно границы подразумеваются под «границами плёнки»;

– в четвёртом защищаемом положении не до конца раскрыт термин «стабильная относительно толщины характеристика».

2) В тексте диссертации недостаточно детализирована методика проведения экспериментальных исследований (раздел 2.5). В частности, отсутствует схема экспериментальной установки с подробным описанием компонентов, не указаны погрешности измерительных приборов и результатов измерений.

3) В диссертационной работе уделено недостаточно внимания температурным эффектам, которые могут влиять на оптические характеристики сенсоров и тонких плёнок, особенно при значительной степени поглощения падающего электромагнитного излучения.

4) При оформлении диссертационной работы автором допущены многочисленные стилистические неточности-олицетворения, погрешности в использовании терминов, опечатки и т.п. Например:

– на с. 2 вместо термина «погрешности бесконтактной волновой спектроскопии» следовало использовать термин «погрешности измерений в волноводной спектроскопии»;

– на с. 8 словосочетание «работа предполагает решение...», избегая олицетворения, правильно записать «в работе предполагалось решение ...»;

– на с. 14 под словосочетанием «поверхностное рассеивание излучения» подразумевается результат, поэтому более точным термином является «поверхностное рассеяние излучения»;

– на с. 18 во фразе «при низких оптических потерях ($k < 10^{-5}$) излучения выходит за пределы измерительной схемы», видимо, пропущено слово «часть» перед словом «излучения»;

– на с. 20 вместо слов «с учётом минимизации влияния лучей высших порядков на её полную отражательную способность» следует использовать «с учётом минимизации влияния многократного отражения на интегральный коэффициент отражения».

– на графике, изображённом на рисунке 3.10 (с. 72), единицы измерения записаны как латиницей, так и кириллицей.

В автореферате также встречаются опечатки и нарушения правил оформления текста:

– на с. 14 в подрисуночной подписи к рисунку 2 в слове «одностороннее» пропущена буква «е»; номера фрагментов обозначены буквами кириллического алфавита («(а)» и «(б)»), что не соответствует обозначениям фрагментов буквами латинского алфавита на рисунке («a» и «b»).

– на с. 14 в последней строке в термине «скин-эффектов» пропущена буква «к» и др.

4. Конкретные научные результаты (с указанием их новизны и практической значимости), за которые соискателю может быть присуждена искомая учёная степень

Диссертационная работа Евгения Александровича Чудакова «Новые методы оптической диагностики тонких пленок» соответствует п. 20 «Положения о присуждении учёных степеней и присвоении учёных званий в Республике Беларусь» и содержит новые научные результаты, относящиеся к актуальным научным направлениям (нанооптика, металлооптика, методы оптических и спектральных измерений).

Учёная степень кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – «Оптика» может быть присуждена Чудакову Евгению Александровичу за:

– разработку получившего экспериментальное подтверждение нового метода бесконтактной волноводной спектроскопии тонких пленок, предназначенного для исследования слоистого образца без физического контакта с призмой связи;

– аналитический вывод условий возбуждения мод Ценнека в бинарных структурах, нанесённых на высокопреломляющую призму, и проверка полу-

ченных выражений при использовании чувствительных элементов в тонкоплёночных сенсорах концентрации водорода;

– соотношения взаимности, полученные для коэффициентов отражения и прохождения, выполняющиеся при распространении электромагнитного излучения в прямом и обратном направлении через систему слоёв из изотропных сред;

– электродинамическую модель аномального скин-эффекта в металлических пленках, разработанную с учетом дисперсии, диссипации энергии и вероятности зеркального и диффузного рассеяния электронов на границах пленки;

– оптимизацию параметров сенсорных систем на основе фотонно-кристаллических волокон с тонкопленочными покрытиями в целях повышения точности определения концентрации адсорбированных веществ.

5. Соответствие научной квалификации соискателя учёной степени, на которую он претендует

На основании результатов анализа диссертации, автореферата и работ, опубликованных Е. А. Чудаковым, можно сделать вывод о *соответствии научной квалификации соискателя ученой степени* кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – оптика.

Выражаем своё согласие на размещение отзыва о диссертации на сайте ГНУ «Институт физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси» в глобальной компьютерной сети Интернет.

Председатель семинара
кандидат физ.-мат. наук

А.Л. Самофалов

Эксперт оппонировающей организации
кандидат физ.-мат. наук

А.А. Шамына

Секретарь семинара
кандидат физ.-мат. наук

А.Н. Годлевская