

ОТЗЫВ

на диссертацию Чудакова Евгения Александровича
«Новые методы оптической диагностики тонких пленок»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – оптика

1. Соответствие содержания диссертации заявленной специальности и отрасли науки.

Диссертационная работа Чудакова Е.А. посвящена развитию оптических методов диагностики тонких пленок. Исследование проводится путём математического моделирования оптических полей в тонкопленочных структурах. Представлена экспериментальная апробация полученных соотношений и сравнение с уже известными результатами. Содержание работы по объекту, предмету, методам исследования и выносимым на защиту положениям соответствует пунктам 2 (оптические волноводы), 3 (нанооптика) и 5 (методы оптических и спектральных измерений) раздела III паспорта специальности 01.04.05 – оптика и отрасли «физико-математические науки».

2. Актуальность темы диссертации.

Развитие оптического приборостроения, интегральной оптики, микроэлектроники и микросенсорики создаёт потребность в непрерывном совершенствовании методов оптической диагностики тонких пленок и вызывает значительное число современных публикаций по данному направлению. В этой связи тема диссертации Чудакова Е.А. является актуальной. В диссертации заложены основы модификации уже известного метода m -линий, направленной на локальную бесконтактную диагностику наноразмерных слоев; развита теория аномального скин-эффекта в металлических пленках, позволяющая исследовать оптические поля в пленках, толщина которых сопоставима с длиной свободного пробега электронов проводимости, рассчитать коэффициенты отражения и прохождения света при зондировании таких пленок и оценить характеристики плазмонных мод в сенсорной схеме Кречмана; получены соотношения взаимности для изотропных слоистых сред, облегчающие оптимальное проектирование интерференционных покрытий; исследованы тонкопленочные структуры для детектирования газов в атмосфере. Актуальность диссертации подтверждается также достаточно широкой опубликованностью представленных результатов в авторитетных научных изданиях, их апробацией на ряде конференций, внедрением в производство и в учебный процесс, а также выполнением исследований в рамках трех заданий государственных программ научных исследований, аспирантского гранта и двух хозяйственных договоров с производственными организациями Беларуси.

3. Степень новизны результатов, полученных в диссертации и научных положений, выносимых на защиту.

Основные результаты диссертационной работы Чудакова Е.А. и научные положения, выносимые на защиту, обладают несомненной новизной. Автором впервые:

- разработан и апробирован экспериментально метод бесконтактной волноводной спектроскопии тонких пленок, основанный на регистрации и анализе m -линий при возбуждении слоистой среды сфокусированным лазерным пучком и обладающий высокой чувствительностью к вариациям параметров наноразмерных пленок на подложках (защищаемое положение 1);
- в результате анализа волновых уравнений сформулированы и применены к оптимальному синтезу интерференционных покрытий соотношения взаимности для изотропных плоскостойких сред (защищаемое положение 2);
- развит метод интегральных уравнений для описания аномального скин-эффекта в наноразмерных металлических пленках, на основании которого исследованы оптические поля в таких пленках, в частности, обнаружен эффект усиления поля плазмонной моды вблизи границ пленки (защищаемое положение 3);
- разработана модель спектральной эллипсометрии металлических пленок, учитывающая аномальный скин - эффект, позволяющая определить константы электронного газа в металлических пленках и диэлектрическую проницаемость ионного остова металла (защищаемое положение 4);
- предложена схема оптического сенсора концентрации водорода в атмосфере, основанная на возбуждении мод Ценнека (в литературе также используется термин «моды Зеннека») в бинарной металло-диэлектрической тонкопленочной структуре, нанесенной на основание призмы связи;
- предложено объяснение возникновения резонансных провалов в спектрах пропускания фотонно-кристаллических волокон в конусообразной системе с перетяжкой и поглощающим тонкопленочным покрытием и рассмотрена возможность применения этого эффекта для детектирования концентрации аммиака в атмосфере.

4. Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Сформулированные в диссертации выводы и рекомендации являются достоверными и обоснованными.

Метод бесконтактной волноводной спектроскопии тонких пленок основан на последовательном решении электродинамической задачи об отражении когерентного светового пучка от плоскостойкой среды. Сформулированные условия наблюдения m -линий и корректность решения обратной оптической задачи о восстановлении параметров пленок указанным методом подтверждены экспериментально на примерах восстановления параметров оксидных слоев на поверхности кремния.

Соотношения взаимности для плоскостойких сред получены в результате анализа волновых уравнений для волн s - и p -поляризации. Полученные с их использованием результаты оптимального проектирования интерференционных покрытий и поглотителя солнечного света сомнений не

вызывают. В частности, их корректность подтверждается экспериментальными работами других авторов, результаты которых находятся в согласии со сделанными в работе выводами.

Интегральные уравнения аномального скин-эффекта выведены автором путем аналитических преобразований. Решение этих уравнений осуществляется методом квадратур, эффективность и внутренняя сходимость которого подтверждены численными расчетами. Таким образом, сомнений в корректности установленных автором особенностей поведения электромагнитного поля в металлических пленках и предложенного им алгоритма решения обратной задачи спектральной эллипсометрии металлических пленок не возникает.

Расчет тонкопленочных спектроскопических сенсоров водорода на плазмонной моде и модах Ценнека выполнен в рамках принятой в теории контактной волноводной спектроскопии модели плоской волны с использованием известных из литературы дисперсионных характеристик материалов тонких пленок и призмы связи. Решение дисперсионных уравнений для плазмонных мод и моды Ценнека получено методом контурного интегрирования. Таким образом, проведенный автором сопоставительный анализ чувствительности сенсоров и сделанный на его основе вывод о возможных преимуществах сенсора, работающего на моде Ценнека s-поляризации, являются обоснованными.

Анализ физической природы эффекта резонансного затухания основной моды фотонно-кристаллического волокна в конусовидной системе с перетяжкой и тонкопленочным поглощающим покрытием выполнен на основе метода интегральных уравнений. Поэтому расчеты поперечного распределения полей мод и их затухания, а также оценки чувствительности фотонно-кристаллического сенсора адсорбционного слоя молекул аммиака, осаждаемого на поверхность покрытия, сомнений не вызывают.

5. Научная, практическая, экономическая и социальная значимость результатов диссертации.

Научная и практическая значимость диссертации состоят в том, что в ней развиты эффективные методы оптической диагностики тонких пленок. Метод бесконтактной волноводной спектроскопии имеет сравнительно простую приборную реализацию и может быть использован для локального оптического контроля наноразмерных слоев на подложках в оптике и микроэлектронике. Установленные соотношения взаимности расширяют возможности оптимального проектирования интерференционных покрытий для различных приложений (в частности, для создания антибликовых покрытий на оптических элементах и поглотителей солнечной энергии). Программное обеспечение для расчета таких покрытий используется при спектрофотометрическом определении параметров плоскопараллельных оптических пластин (их показателей преломления и поглощения) на ОАО «Рогачевский завод «Диапроектор» (имеется акт о внедрении результатов в производство на данном заводе). Развитая теория аномального скин-эффекта

уточняет оптическую модель наноразмерных металлических пленок, что имеет существенное значение для диагностики таких пленок методами спектрофотометрии, спектральной эллипсометрии и рефлектометрии. Установленный эффект существенного усиления нормальной компоненты электрического вблизи границ металлических пленок может найти применение для развития техники рамановской спектроскопии молекул в растворах. Предложенная тонкопленочная структура на призме связи, допускающая возбуждение мод Ценнека, может быть использована в качестве чувствительных элементов оптических сенсоров водорода в атмосфере. Сенсорный эффект, связанный с перестройкой резонансных частот в спектрах пропускания фотонно-кристаллических волокон с поглощающими тонкопленочными покрытиями, может быть применен для регистрации адсорбционных молекулярных слоев. Экономическая и социальная значимость результатов диссертации подтверждается актом их внедрения в производство и двумя актами их использования в учебном процессе в Могилевском государственном университете им. А.А. Кулешова.

6. Опубликованность результатов диссертации в научной печати.

Результаты диссертации опубликованы в 34 работах. Из них 7 - статьи в рецензируемых научных журналах, соответствующих перечню ВАК Беларуси для опубликования результатов диссертационных исследований, 9 - статьи в сборниках научных трудов и материалов конференций, 18 - тезисы докладов на конференциях.

Следует отметить целеустремленность и активную работу автора, которые подтверждаются опубликованием 29 работ в период начиная с 2021 года.

Опубликованные материалы полностью отражают научные результаты, изложенные в диссертационной работе.

7. Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК.

Оформление диссертации и автореферата соответствует требованиям, установленным ВАК. Работа состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав (в том числе одна глава - аналитический обзор литературы, четыре главы содержат оригинальные результаты), заключения, списка использованных источников и приложения. Общая характеристика работы включает актуальность, цели и задачи исследования, научную и практическую значимость полученных результатов, защищаемые положения. Объем диссертации составляет 141 страницу. Список использованных источников содержит 153 наименования, включая 34 публикации соискателя. Результаты диссертации изложены в научном стиле, понятным языком. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

8. Замечания по диссертации.

1. Формулировка второго защищаемого положения нуждается в уточнении. На самом деле в нем речь должна идти не просто о встречных волнах, а о встречных волнах с одинаковыми продольными составляющими волновых векторов относительно слоистой среды.

2. Не совсем понятно, о какой производительности оптических систем говорится на с. 28.

3. В тексте не пояснен смысл обозначений, использованных на рис. 1.1 (с.16).

4. На рисунке 1.3 недостаточно ясно видны отличия кривых в случаях стандартной модели и разработанной модели, при этом на рисунке 1.3б график для случая стандартной модели отсутствует.

5. Название рисунка 3.1 (с. 57) плохо отражает его суть. На самом деле, на данном рисунке показано взаимное расположение световых пучков в условиях возбуждения поверхностной волны.

6. На стр. 59 имеется утверждение «В настоящий момент, практическое применение данного метода для передачи информации со скоростью, превышающей скорость света в вакууме, вероятно, технически недостижима в ближайшей перспективе». Передача информации со скоростью, превышающей скорость света в вакууме, принципиально невозможна.

7. В разных местах диссертации автор использует два варианта обозначения поляризации плоских волн: s-, p-, либо TE-, TM. Было бы целесообразным использовать какое-то одно из этих обозначений.

8. Углы падения волны в работе, например, в разделах 2.4, 3.1 и других, указаны с высокой точностью, порядка сотой доли градуса. Не приведена оценка устойчивости полученных автором результатов при изменении угла падения.

9. В разделе 2.5 описывается предсказанное и наблюдаемое распределение отраженного пучка в виде «m-линии», оно показано на рис. 2.5. Однако качество фотографии на рис. 2.4 не позволяет рассмотреть указанный профиль линии.

10. В разделе 3.2 используется термин «вейст», более предпочтительным является «перетяжка».

11. На с. 118, где обсуждается причина более высокого затухания плазмонной моды при вероятности зеркального отражения электронов $r_1=0$ по сравнению со случаем $r_1=1$, имеется спорное утверждение «Вероятная причина - большее удаление поля плазмонной моды от призм связи (рисунок 5.7b) при $r_1=1$, что снижает потери энергии моды за счет утечки ее в призму связи». Здесь, помимо явной опечатки (повтора слов), непонятно, каким образом утечка энергии моды в призму связи может уменьшить ее затухание.

12. Обоснование метода бесконтактной волноводной спектроскопии ограничено моделью падающего гауссова пучка. Представляет интерес обобщение этой модели на случай использования в качестве источника света одномодового однополяризационного фотонно-кристаллического волокна, обеспечивающего стопроцентную пространственную когерентность и практически линейную поляризацию падающего пучка. Это замечание можно расценивать как пожелание к дальнейшему развитию исследований.

13. Автор допускает ошибки и опечатки при оформлении текста, что вызывает сожаление на фоне достаточно высокого качества научного материала.

Отмеченные замечания не снижают значимости работы в целом.

9. Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует.

Основываясь на результатах изучения диссертационной работы и автореферата, а также анализа основных публикаций соискателя, следует признать, что научная квалификация Чудакова Е.А., автора диссертация «Новые методы оптической диагностики тонких пленок», соответствует ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – оптика.

10. Выводы.

Диссертация содержит новые научные теоретические и экспериментальные результаты по актуальному направлению научных исследований - оптики волноводов и тонких пленок.

Диссертационная работа «Новые методы оптической диагностики тонких пленок», представленная Чудаковым Евгением Александровичем на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – оптика, является завершенной квалификационной работой, удовлетворяющей требованиям ВАК Республики Беларусь. Ее автор заслуживает искомой ученой степени за:

- обоснование и экспериментальную апробацию метода бесконтактной волноводной спектроскопии тонких пленок;
- установление возможностей возбуждения незатухающих мод Ценнека s- и p-поляризации в бинарных пленочных структурах, нанесенных на основание призмы связи и использования таких структур в качестве чувствительных элементов сенсоров концентрации водорода в атмосфере;
- физическую интерпретацию возникновения резонансов в спектре пропускания фотонно-кристаллического волокна в конусообразной системе с тонкопленочным покрытием и оценку возможностей использования этого эффекта в волоконно-оптическом сенсоре адсорбционного слоя;
- электродинамическое обоснование соотношений взаимности для изотропных слоистых структур с произвольным одномерным распределением комплексной диэлектрической проницаемости и анализ

возможного применения этих соотношений к оптимальному синтезу антибликовых интерференционных покрытий и поглотителей солнечного света.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
профессор,

член-корреспондент НАН Беларуси,
заместитель генерального директора
по научной деятельности ГНПО

«Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»



И.В. Семченко

Я, Семченко Игорь Валентинович, даю согласие на публикацию данного отзыва в открытом доступе на официальном сайте Института физики НАН Беларуси.



И.В. Семченко

11.01.2025



 С.В. Фролова