

Государственное научное учреждение
«ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ИМЕНИ Б. И. СТЕПАНОВА НАЦИОНАЛЬНОЙ
АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

Объект авторского права
УДК 537.874.6:621.372.8

ЧУДАКОВ
Евгений Александрович

**НОВЫЕ МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ
ТОНКИХ ПЛЕНОК**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

по специальности 01.04.05 – оптика

Минск, 2024

Научная работа выполнена в учреждении образования «Могилевский государственный университет имени А. А. Кулешова»

Научный руководитель: **Сотский Александр Борисович**,
доктор физико-математических наук,
профессор кафедры физики и компьютерных технологий учреждения образования «Могилевский государственный университет имени А. А. Кулешова»

Официальные оппоненты: **Семченко Игорь Валентинович**,
доктор физико-математических наук,
член-корреспондент НАН Беларуси,
заместитель главного директора по научной деятельности ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»

Кулак Геннадий Владимирович,
доктор физико-математических наук,
профессор кафедры общей физики и методики преподавания физики учреждения образования «Мозырский государственный педагогический университет имени И.П. Шамякина»

Оппонирующая организация: Учреждение образования «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины»

Защита состоится 21 января 2025 г. в 14.30 на заседании совета по защите диссертаций Д 01.05.01 при Институте физики имени Б. И. Степанова НАН Беларуси по адресу: 220072, пр. Независимости 68-2, г. Минск, Республика Беларусь.

Тел. ученого секретаря совета: +375 17 270 87 98,
e-mail: m.parkhots@ifanbel.bas-net.by

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики имени Б. И. Степанова НАН Беларуси.

Автореферат разослан 16 декабря 2024 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций,
кандидат физико-математических наук



М.В. Пархоц

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время интенсивно развиваются методы оптической диагностики тонких пленок. Это обусловлено, с одной стороны, запросами современной микроэлектроники и оптики, а с другой – тем, что классические методы спектральной эллипсометрии и спектрофотометрии имеют ряд ограничений. В своем классическом варианте эти методы предполагают использование световых пучков с диаметром миллиметрового порядка, что затрудняет локальное зондирование тонких пленок. К тому же, их применение осложнено необходимостью нахождения дисперсии материалов структур. Последнее ограничение отсутствует в когерентных многоугловых эллипсометрии и рефлектометрии. Но и эти подходы предполагают использование широких монохроматических пучков. Кроме того, в них имеет место механическое вращение образцов, которое негативно сказывается на скорости измерений и вносит шумы в детектируемый сигнал. В диссертации рассмотрен метод рефлектометрии тонких пленок сфокусированным пучком, свободный от указанных ограничений. Его прототипом является классический метод волноводной спектроскопии тонких пленок, основанный на анализе распределения интенсивности лазерного пучка, отраженного от призмного устройства связи при фиксированном угле падения. Анализ проводится в пределах m - линии в виде двух максимумов и центрального минимума названного распределения, наблюдаемой при резонансном возбуждении волноводной моды пленки. Однако классический метод волноводной спектроскопии является контактным, что приводит к искажающему влиянию на результаты измерений призмы связи. Кроме того, эффективное возбуждение волноводных мод требует протяженной (миллиметрового порядка) области оптического контакта призмы связи с исследуемой пленкой, что исключает возможность ее локальной диагностики. Для преодоления указанных ограничений в диссертации предложен бесконтактный вариант волноводной спектроскопии, не требующий использования призмы связи. В нем локальное зондирование слоя осуществляется за счет возбуждения в структуре мод Ценнека s -, либо p -поляризации лазерным пучком, сфокусированным непосредственно на поверхность слоя. При определенных условиях распределение интенсивности отраженного от пленки пучка имеет, как и в стандартной волноводной спектроскопии, вид m -линии. Контур m -линии, измеряемый матрицей фотоприемников, экстремально чувствителен к характеристикам пленки. На этой основе предложен новый метод контроля толщины и показателя преломления ультратонких (наноразмерных) пленок. Его особенностями являются локальный контроль пленки, отсутствие опорного сигнала и отсутствие необходимости механического вращения образца, способствующие стабильности измерений. Эффективность метода

подтверждена экспериментами по диагностике оксидных слоев на поверхности кремния.

Одним из направлений развития метода бесконтактной волноводной спектроскопии применительно к тонкопленочным оптическим сенсорам параметров сред является поиск пленочных структур, в которых возможно возбуждение мод Ценнека. В диссертации под этим углом зрения исследован сенсор концентрации водорода в атмосфере, чувствительным элементом которого служит бинарная тонкопленочная структура оксид кремния – палладий, нанесенная на основание высокопреломляющей призмы связи. Выполненные в работе оценки показали, что данный сенсор характеризуется более высокой чувствительностью по сравнению с классическим плазмонным аналогом со схемой Кречмана.

В настоящее время интенсивно исследуются оптические сенсоры на основе тонкопленочных структур в оптических волокнах, использующие резонансную связь вытекающих мод. В диссертации исследован механизм возникновения резонансных провалов в спектрах пропускания фотонно-кристаллических волокон с поглощающими тонкопленочными покрытиями. Установлено, что названные провалы объясняются резонансным возбуждением стоячих волн между системой образующих волокно воздушных каналов и тонкопленочным покрытием. Рассмотрено использование этого эффекта для детектирования концентрации аммиака в атмосфере.

Важным современным направлением в изучении тонкопленочных структур является диагностика и оптимальное проектирование интерференционных покрытий для применений в зеркалах, антибликовых элементах и поглотителях солнечной энергии. В диссертации путем анализа волновых уравнений для волн s - и p -поляризации в слоистой среде с произвольным пространственным профилем комплексной диэлектрической проницаемости получены строгие соотношения взаимности для коэффициентов отражения и прохождения плоских волн при освещении среды во встречных направлениях. На их основе найдены параметры оптимизированных металлодиэлектрических и диэлектрических интерференционных покрытий на диэлектрических пластинах, выполняющих функции невзаимного поглотителя солнечной энергии и взаимных антибликовых структур. В частности, объяснены отмечавшиеся в ряде экспериментальных работ преимущества симметричных двухсторонних антибликовых покрытий перед их односторонними аналогами.

В современной оптике стоит проблема выбора электродинамической модели наноразмерных металлических пленок. В таких пленках длина свободного пробега электронов проводимости сопоставима с толщиной пленок, что ставит под сомнение применимость классической модели

нормального скин-эффекта Друде, основным допущением которой является локальная связь плотности тока с напряженностью электрического поля в металле. Недостатки данной модели проявляются в зависимости комплексной диэлектрической проницаемости металлических пленок от их толщины и от угла падения света при попытках их оптической диагностики. В работе представлена модель аномального скин-эффекта, свободная от указанного допущения. В ней вместо интегро-дифференциальных уравнений аномального скин-эффекта для полугограниченного металла, предложенных ранее классиками, сформулированы более простые интегральные уравнения Фредгольма второго рода относительно напряженности электрического поля в пленках, допускающие численное решение методом квадратур. Модель позволила выполнить корректную обработку экспериментальных данных спектральной эллипсометрии наноразмерных золотых пленок и выяснить влияние образующегося в пленках объемного заряда на плазмонные моды в сенсорной схеме Кречмана.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Исследование по теме диссертации выполнено в период с 2020 по 2024 год в учреждении образования «Могилевский государственный университет имени А.А. Кулешова» в рамках следующих программ и тем: ГПНИ «Фотоника, опто- и микроэлектроника», НИР 1.3.03 «Разработка теории методов оптического контроля наноразмерных тонкопленочных структур» (№ ГР 20161336, 2019 – 2020 гг.); ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций», НИР 1.15 «Разработка метода бесконтактной волноводной спектроскопии тонкопленочных структур и сред» (№ ГР 20211116 от 07.05.2021, 2021-2025 гг.); НИР по гранту для аспирантов Министерства образования Республики Беларусь «Модель зеркального отражения электронов от границ металлической пленки в теории аномального скин-эффекта» (№ ГР 20230528, сроки выполнения: 21.03.2023 – 31.12.2023); договор с ООО «ЭссентОптикс», НИР «Разработка программного обеспечения для контроля показателя преломления и толщины растущего слоя в процессе нанесения на плоскопараллельную диэлектрическую подложку интерференционного покрытия» (№ 758-3 от 03 июня 2022 г. сроки выполнения: 03.06–10.12.2022); договор с ОАО «Рогачевский завод «Диaproектор», НИР «Методика определения показателей преломления и поглощения плоскопараллельной диэлектрической пластины с помощью спектрофотометра PHOTON RT (EssentOptics, Беларусь)». (№ 2548 от 18 декабря 2023 г.), сроки выполнения: 26.12.2023 – 26.02.2024).

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Цель диссертационной работы состоит в выяснении принципиальных ограничений стандартной волноводной спектроскопии тонких пленок, в разработке нового метода бесконтактной (беспризменной) волноводной спектроскопии, в развитии электродинамических моделей диэлектрических и металлодиэлектрических слоистых структур.

Работа предполагает решение следующих *задач*:

– разработку теории отражения сфокусированных лазерных пучков s - и p -поляризации от плоскостойких сред, содержащих наноразмерные пленки, определение условий наблюдения m -линий в распределениях интенсивности отраженных пучков, экспериментальную проверку теории и восстановление параметров наноразмерных пленок;

– развитие теоретической модели сенсорного эффекта детектирования концентрации водорода в атмосфере за счет использования мод Ценнека бинарной тонкопленочной структуры оксид кремния – палладий, нанесенной на основание высокопреломляющей призмы связи;

– выяснение физической природы сенсорных эффектов в фотонно-кристаллических волокнах с наноразмерными поглощающими покрытиями, прогнозирование свойств соответствующих сенсоров адсорбционных слоев;

– получение общих выражений для коэффициентов отражения и пропускания электромагнитных волн s - и p -поляризации при освещении изотропной плоскостойкой среды с произвольным пространственным профилем комплексной диэлектрической проницаемости со встречных направлений, анализ данных выражений с позиций выяснения свойств взаимности плоскостойких сред и оптимального синтеза антибликовых интерференционных покрытий;

– формулировку интегральных уравнений аномального скин-эффекта в металлических пленках, исследование на их основе оптических полей в металлических пленках, разработку алгоритмов спектральной эллипсометрии металлических пленок в условиях аномального скин-эффекта.

Объектом исследования являются тонкопленочные структуры, наноразмерные металлические и диэлектрические слои.

Предмет исследования – электродинамика наноразмерных тонкопленочных структур.

Научная новизна. В работе впервые:

1. Определены условия наблюдения m -линий в распределениях интенсивности лазерных пучков, отраженных от ультратонких (наноразмерных) пленок на подложках. Установлено, что контраст m -линий экстремально чувствителен к параметрам пленок. На этой основе предложен

новый метод контроля толщин и показателей преломления ультратонких пленок.

2. Путем решения дисперсионных уравнений для мод слоистых сред на комплексной плоскости установлена закономерность, состоящая в существовании бездиссипативных мод Ценнека s - и p - поляризации в тонкопленочных структурах, нанесенных на основание призмы связи, допускающих возбуждение под углами нулевого отражения.

3. Установлено, что причиной появления резонансных провалов в спектрах пропускания фотонно-кристаллических волокон с тонкопленочными покрытиями является резонансное усиление амплитуд стоячих волн между образующими воздушными каналами и покрытием волокна. Получены оценки спектров пропускания волоконно-оптических сенсоров аммиака в воздухе, использующих названный эффект.

4. Дано электродинамическое обоснование соотношений взаимности для коэффициентов отражения и пропускания электромагнитных волн s - и p -поляризации при освещении плоскослоистой среды с произвольным пространственным профилем комплексной диэлектрической проницаемости со встречных направлений. Показано, что энергетические коэффициенты прохождения встречных волн совпадают всегда, а для энергетических коэффициентов отражения подобное совпадение имеет место только при отсутствии в среде поглощения.

5. Путем совместного анализа системы уравнений Максвелла и кинетического уравнения Больцмана сформулированы системы интегральных уравнений Фредгольма второго рода, описывающие аномальный скин-эффект в наноразмерных металлических пленках для волн s - и p -поляризации при произвольных вероятностях зеркального отражения электронов проводимости от границ пленок.

6. На основании развитой теории аномального скин-эффекта разработан алгоритм решения обратной задачи спектральной эллипсометрии металлических пленок, позволяющий определить диэлектрическую проницаемость ионного остова металла и константы газа электронов проводимости.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработан и апробирован экспериментально метод бесконтактной волноводной спектроскопии тонких пленок, состоящий в получении (за счет возбуждения слоистой среды сфокусированным лазерным пучком s -, либо p -поляризации) и анализе m -линий, экстремально чувствительных к параметрам наноразмерных пленок на подложках. Особенности метода являются локальный контроль параметров пленок, отсутствие опорного сигнала и

необходимости механического вращения образцов, способствующие стабильности измерений.

2. В результате строгого анализа волновых уравнений установлены соотношения взаимности, согласно которым энергетические коэффициенты пропускания для наклонно падающих со встречных направлений на изотропную плоскослоистую среду с произвольным пространственным профилем комплексной диэлектрической проницаемости волн s -, либо p -поляризации совпадают, а для энергетических коэффициентов отражения подобное совпадение имеет место только при отсутствии в среде поглощения. Применение данных соотношений к проектированию антибликовых интерференционных покрытий показало, что оптимизированное просветляющее двухстороннее интерференционное покрытие обеспечивает примерно в пять раз меньший по величине средний энергетический коэффициент отражения по сравнению с оптимизированным односторонним покрытием.

3. Разработан метод интегральных уравнений для расчета оптических полей s - и p -поляризации в металлических пленках в условиях аномального скин-эффекта. С его использованием обнаружена закономерность, согласно которой компоненты электромагнитного поля, поляризованные параллельно границам металлической пленки, с высокой точностью описываются теорией нормального скин-эффекта, а компонента электрического поля, нормальная границам пленки, испытывает резкое усиление в окрестности данных границ, которое может быть описано только в рамках теории аномального скин-эффекта.

4. На основании развитой теории аномального скин-эффекта предложена уточненная математическая модель эллипсометрии металлических пленок, в которой независимо варьируемыми являются диэлектрическая проницаемость ионного остова металла, плотность и время релаксации электронного газа, а также вероятности зеркального отражения электронов от границ пленки. Применение названной модели к исследованию золотых пленок показало, что стабильной относительно толщины пленки характеристикой является не фигурирующая в стандартной модели эллипсометрии суммарная (учитывающая ток проводимости) диэлектрическая проницаемость металла, а лишь диэлектрическая проницаемость ионного остова металла.

Личный вклад соискателя ученой степени в результаты диссертации. Диссертационная работа отражает личный вклад соискателя в разработку новых методов оптической диагностики тонких пленок. Представленный в диссертации физический анализ и материал, на основе

которого сформулированы защищаемые положения, принадлежат соискателю. Научным руководителем, доктором физико-математических наук Сотским Александром Борисовичем определено направление исследований, сформулированы задачи диссертации и предложены методы их решения, осуществлялось общее руководство и проводилось обсуждение возможности практического применения разработанных в диссертационной работе подходов. Сотская Л.И., соавтор работ [1; 2; 6; 7; 13-16; 20; 28; 34] внесла вклад в разработку и отладку компьютерных программ для численного исследования сенсорных эффектов. Соавторам работы [2] Минковичу В.П. и Sicacha S.M. принадлежат ее экспериментальная и технологическая части. Шилову А.В., соавтору работ [2; 6; 12] принадлежат оптимизационные решения при разработке сенсоров показателя преломления и давления в жидких средах. Экспериментальная часть работы [6] выполнена автором совместно с Шиловым А.В. Соавтору работ [8; 9; 12; 17; 24; 33] Парашкову С.О. принадлежат экспериментальная и технологическая части. Соавтор работ [11; 13; 14; 26; 27; 29; 32] Стаськов Н.И. определил и предоставил спектральные характеристики материалов антибликовых покрытий. Работа [30] выполнена соискателем самостоятельно. Остальные соавторы принимали участие в решении отдельных вопросов и задач, не вошедших в диссертационную работу.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Материалы, вошедшие в диссертационную работу, неоднократно обсуждались на заседаниях Могилевского оптического семинара и были доложены на следующих научных конференциях: «Проблемы взаимодействия излучения с веществом» (Гомель, 2021); «Оптика неоднородных структур» (Могилев, 2019); «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (Могилев, 2019, 2021 – 2024); «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности» (Могилев, 2019); «Современные методы и приборы контроля качества диагностики состояния объектов» (Могилев, 2024); «XIX International Workshop on New Approaches to High-Tech» (Минск, 2021); «Инновационные технологии в агропромышленном комплексе» (Гомель 2021); «3rd International Conference on Light and Light-based Technologies» (Ankara, Turkey, 2022); «Опто-, Микро- И СВЧ-электроника – 2022» (Минск, 2022); «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния» (Минск, 2022); «Квантовая электроника» (Минск, 2023); «Актуальные вопросы физики и техники» (Гомель, 2021); IX Всероссийская научная молодежная школа-конференция «Химия, физика, биология: пути интеграции» (Москва, 2022);

«Итоги научных исследований ученых МГУ имени А.А. Кулешова» (Могилев, 2021, 2022); «Молодая наука» региональная научно-практическая конференция студентов и аспирантов вузов Могилевской области (Могилев, 2019, 2021).

Результаты диссертации внедрены в учебный процесс факультета математики и естествознания УО «Могилевский государственный университет имени А.А. Кулешова» и используются в лекционных курсах по дисциплинам «Специальный физический практикум» и «Оптика» (два акта о практическом использовании представлены в приложении А к диссертации). Получен акт внедрения результатов в производство на заводе «Диапроектор» (г. Рогачев, 28.02.2024).

Опубликованность результатов диссертации

Результаты диссертации опубликованы в 34 научных работах, из которых 7 статей общим объемом 4,5 авторского листа – в рецензируемых научных журналах, соответствующих перечню ВАК Беларуси для опубликования результатов диссертационных исследований, 9 статей в сборниках научных трудов и 18 тезисов докладов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, списка использованных источников и приложения, имеются два акта о практическом использовании результатов в учебном процессе и один акт внедрения результатов в производство. Полный объем диссертации составляет 141 страницу, включая 34 рисунка на 17 страницах, 10 таблиц на 4 страницах, 1 приложение на 3 страницах. В диссертации цитированы 153 использованных источника (включая 34 публикации соискателя), библиографические описания которых занимают 15 страниц.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В главе 1 выполнен аналитический обзор литературы, в котором обозначена совокупность современных проблем при диагностике тонких пленок. В разделе **1.1** проанализированы основные недостатки известных методов неразрушающего контроля оптических характеристик тонких пленок. Детально описан метод волноводной спектроскопии, обозначены ограничения, связанные с применением в данном методе призмы связи. В разделе **1.2** рассматривается вариант метода контактной волноводной спектроскопии, в котором измеряется угловая зависимость отражательной способности призмы связи, прижатой к исследуемой планарной структуре. Исследовано возбуждение пленки оксинитрида кремния, расположенной на подложке из оксинитрида кремния с повышенным содержанием кислорода,

посредством призмы связи из галлий-гадолиниевого граната. Установлено, что при приближении точки ввода светового пучка в пленку к выходному ребру призмы связи темная m - линия может трансформироваться в светлую m -линию. Этот эффект объясняется особенностями выполнения условия излучения Зоммерфельда при наличии поглощения в призме связи, что в стандартной теории туннельного возбуждения оптических волноводов не учитывается и является ее принципиальным ограничением. В разделе **1.3** описаны теоретические и экспериментальные аспекты при разработке оптических терагерцовых сенсоров растворов отражательного типа, основанных на принципе нулевого отражения, которые при углах, близких к углу Брюстера, приводят к возбуждению быстрых мод Ценнека. В разделе **1.4** рассмотрены проблемы, возникающие при исследовании интерференционных покрытий. В разделе **1.5** исследованы ограничения классической модели Друде при диагностике оптических характеристик металлических пленок, обоснован выбор направления исследований и изложена общая концепция диссертационной работы.

Глава 2 посвящена разработке нового неразрушающего метода контроля толщин и показателей преломления наноразмерных пленок, основанного на локальном зондировании исследуемой структуры за счет возбуждения в ней бездиссипативных мод Ценнека s -, либо p -поляризации сфокусированными лазерными пучками. В разделе **2.1** представлено строгое решение векторной электродинамической задачи об описании пространственного распределения интенсивности когерентного светового пучка, отраженного от плоскостойкой среды, основанное на фурье-анализе полей. В разделе **2.2** рассмотрены возможности анализа интегральных соотношений для полей пучков, полученных в разделе **2.1** методом перевала. В разделе **2.3** на основе результатов раздела **2.2** установлены условия возникновения m -линий в пространственном распределении интенсивности гауссова пучка, отраженного от ультратонкого слоя. Они имеют вид

$$\partial R / \partial \theta = 0, \quad \varepsilon_a k_0^2 w^2 R / (\partial^2 R / \partial \theta^2) < 1,$$

где w - радиус падающего пучка в перетяжке;

R - плосковолновой энергетический коэффициент отражения света от границы раздела пленка – воздух;

k_0 - волновое число вакуума;

ε_a - диэлектрическая проницаемость воздуха;

θ - угол падения пучка.

Функция $R(\theta)$ и ее производные берутся в точке ее минимума. Согласно приведенным формулам, m – линии довольно просто получить при условиях, близких к условиям возбуждения мод Ценнека, т.е. когда $R \rightarrow 0$. Об этом

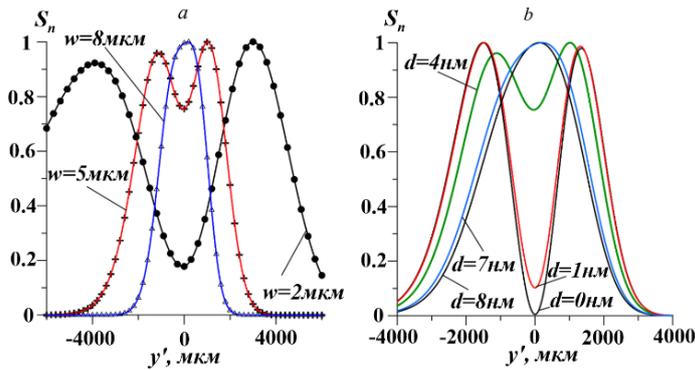


Рисунок 1 - Структура m-линий при волноводной спектроскопии ультратонких слоев SiO₂ на кремниевой подложке при различных радиусах пучка w (a) и толщинах d (b)

соответствует различным толщинам пленки при $w = 5$ мкм. Согласно рисунку 1b и другим представленным в разделе 2.2 результатам, имеет место экстремально высокая чувствительность контрастности m-линии к толщине слоя d при $d \leq 4$ нм. В разделе 2.4 сопоставлены погрешности определения толщин d и показателей преломления n_i пленок методом бесконтактной волноводной спектроскопии и стандартным методом многоугловой когерентной рефлектометрии. Анализ погрешностей показал, что при одновременном определении двух параметров ультратонкого слоя d и n_i или одного параметра d предложенный метод характеризуется гораздо меньшими (на 1–3 порядка) коэффициентами ошибок, чем стандартный подход. В разделе 2.5 представлены эксперименты по реализации m-линий и обработке их контуров методом наименьших квадратов с целью решения обратных оптических задач по определению d и n_i для различных оксидных слоев на кремниевой подложке, подтвердившие эффективность развитого метода. В частности, получена удовлетворительная корреляция восстановленных параметров с их независимыми оценками методом спектральной эллипсометрии.

Глава 3 посвящена тонкопленочным сенсорам параметров сред на основе волноводных структур. Здесь рассмотрены бинарные тонкопленочные чувствительные элементы на призме связи, позволяющие реализовать нулевые коэффициенты отражения от устройств волн s-, либо p-поляризации при возбуждении бездиссипативных мод Ценнека и сенсоры на основе фотонно-кристаллических волокон с чувствительными элементами в виде тонкопленочных покрытий. В разделе 3.1 анализируются спектры энергетических коэффициентов отражения плоских волн от слоистых структур, нанесенных на основание призмы связи. Установлено, что бинарная

позволяет судить рисунок 1 на котором представлена структура m-линий в распределении интенсивности отраженного от наноразмерной пленки светового пучка p-поляризации, регистрируемом матрицей фотоприемников, отстоящей от пленки вдоль оси пучка на 5 см. Рисунок 1a иллюстрирует влияние на структуру m-линии ширины пучка при толщине пленки $d = 4$ нм, рисунок 1b

структура, составленная из пленок двуокиси кремния (эта пленка контактирует с призмой) и палладия, нанесенных на основание призмы связи из двуокиси циркония, может направлять бездиссипативные моды Ценнека s -, либо p -поляризации, возбуждаемые под углами нулевого отражения плоских волн от структуры. Возбуждение этих мод позволяет наблюдать сенсорный эффект, состоящий в сдвиге минимума спектра энергетического отражения волны $R(\lambda)$ при изменении концентрации водорода в атмосфере. В таблице 1 представлены спектральные чувствительности четырех типов сенсоров (сенсоры 1, 2 работают на плазмонных модах, 3, 4 – на модах Ценнека). Через Δy_2 и Δy_3 обозначены толщины пленок SiO_2 и Pd , θ - угол минимального отражения при падении волны из призмы связи, $\Delta\lambda$ - сдвиг координаты минимума зависимости $R(\lambda)$ при изменении концентрации водорода в атмосфере от 0 до 1 %.

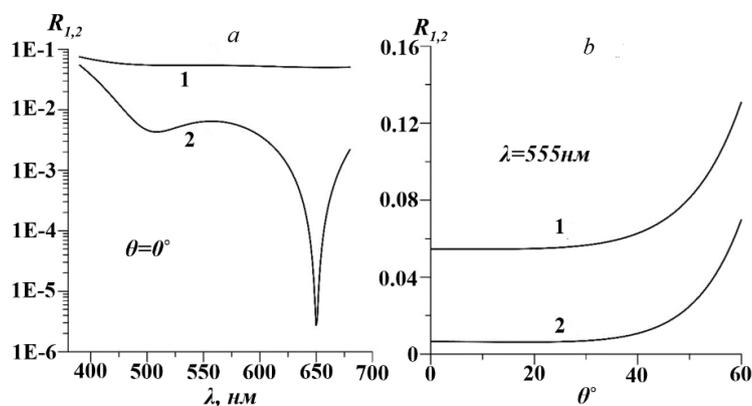
Таблица 1 - Сравнение спектральной чувствительности исследованных сенсоров водорода призмного типа. Рабочая длина волны $\lambda = 1.28$ нм

№ сенсора	Поляризация	Δy_2 , нм	Δy_3 , нм	θ , град	$\Delta\lambda$, нм
1	p	60	0	35.66	2.9
2	p	8	0	6	-1.0
3	p	8	1050	24.05	1.5
4	s	8	2000	25.09	4.1

Согласно таблице 1, наибольшей чувствительностью обладает сенсор № 4, работающий на моде Ценнека s -поляризации. В разделе 3.2 исследуется сенсор аммиака в атмосфере, использующий эффект резонансной связи основной моды кварцевого фотонно-кристаллического волокна с поглощающим тонкопленочным (600 нм) покрытием из двуокиси олова, легированной сурьмой (7 %), нанесенным на поверхность оболочки волокна. С использованием строгого метода интегральных уравнений в теории фотонно-кристаллических волокон установлено, что в спектре пропускания волокна $T(\lambda)$ имеется резкий минимум, формирование которого объясняется резонансным усилением (на 3 порядка) амплитуды стоячей волны, образующейся между воздушными каналами волокна и покрытием. Локализация данного минимума на шкале длин волн определяется фазовым синхронизмом основной моды волокна с основными модами s - и p -поляризации покрытия. Показано, что формирование на поверхности покрытия абсорбционного молекулярного слоя аммиака толщиной 0.37 нм приводит к допускающему детектирование сдвигу координаты минимума $\lambda = 1298$ нм функции $T(\lambda)$ на $\Delta\lambda = 0.8$ нм.

Глава 4 посвящена исследованию свойств тонкопленочных интерференционных покрытий. В разделе 4.1 представлен анализ волновых

уравнений для волн s - и p -поляризации в слоистой среде с произвольным пространственным профилем комплексной диэлектрической проницаемости. Анализ проводится с позиций установления соотношений взаимности для коэффициентов отражения и прохождения волн при освещении слоистой среды во встречных направлениях. Такие соотношения получены для монохроматических и частично когерентных волн, создаваемых удаленным источником малых размеров. Показано, что энергетические коэффициенты прохождения встречных волн совпадают всегда, а для энергетических коэффициентов отражения подобное совпадение имеет место только при отсутствии в среде поглощения. В разделе 4.2 полученные соотношения применены для расчета оптимизированного поглотителя естественного света в виде чередующихся пленок из Al и SiO₂ на диэлектрической пластине из поликарбоната. Показано, что структура из 12 пленок при оптимальном выборе их толщин может обеспечить переход в тепло 99.62 % солнечной энергии в видимом спектральном диапазоне. В разделе 4.3 полученные соотношения взаимности применены к расчету оптимизированных односторонних и двухсторонних интерференционных антибликовых покрытий в виде чередующихся слабо поглощающих пленок ZrO₂ и SiO₂, нанесенных на пластину из поликарбоната. Рассчитаны коэффициенты отражения и прохождения естественного света для четырехпленочных (одностороннее покрытие) и восьмипленочных (двухстороннее покрытие) антибликовых интерференционных покрытий, усредненные по видимому спектральному диапазону и по интервалу углов падения света $0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$ (рисунок 2). Установлено, что при оптимальном выборе толщин пленок двухстороннее симметричное покрытие может обеспечить средний коэффициент отражения света 1.3 %. Это значение примерно в 5 раз меньше аналогичного значения для одностороннего покрытия.



Кривые 1 - односторонне покрытие; кривые 2 - двухстороннее покрытие
Рисунок 2 - Спектральные (а) и угловые (б) зависимости отражательных способностей оптимизированных антибликовых покрытий на РС пластине

В главе 5 развита электродинамическая модель металлических пленок, основанная на теории аномального скин-эффекта. В разделе 5.1 система дифференциальных уравнений Максвелла и кинетического уравнения Больцмана, описывающих аномальный скин-эффект, сведена к более простым интегральным уравнениям Фредгольма второго рода относительно компонент напряженности электрического поля волн s - и p -поляризации в металлической пленке. В них неоднородные части отвечают за нормальный скин-эффект, а интегральные операторы учитывают нелокальную связь плотности тока с напряженностью электрического поля в металле и отражение электронов проводимости от границ пленки. Разработан алгоритм численного решения полученных интегральных уравнений, основанный на методе квадратур. Он пригоден для расчета оптического поля в металлической пленке как в режиме ее стороннего освещения, так и при распространении вдоль пленки плазмонных мод. В разделе 5.2 численно исследованы оптические поля в алюминиевых, титановых и золотых пленках, возбуждаемых волнами s - и p -поляризации. Установлено, что компоненты электрического поля, параллельные границам металлических пленок, рассчитанные по моделям нормального и аномального скин-эффектов, практически совпадают. Для компоненты электрического поля, нормальной границам пленки, подобное совпадение имеет место только в глубине пленки. Вблизи ее границ модуль нормальной компоненты испытывает резкое усиление, зависящее от вероятности зеркального отражения электронов от данных границ. Особенно сильно этот эффект выражен, когда эти вероятности стремятся к единице. В разделе 5.3 на основе модели аномального скин-эффекта выполнена обработка известных из литературы экспериментальных данных для спектров поляризационных углов, измеренных методом спектральной эллипсометрии в диапазоне $300\text{ нм} < \lambda < 2000\text{ нм}$, для золотых пленок с толщинами d 25, 53 и 117 нм, напыленных на поверхность монокристаллического кремния. В модели аномального скин-эффекта металлические пленки характеризуются диэлектрической проницаемостью ионного остова металла $\varepsilon(\lambda)$, концентрацией электронов проводимости n_0 , временем релаксации τ и вероятностями зеркального отражения электронов от границ пленки p_1 (граница пленка – кремний) и p_2 (граница пленка – воздух). Обратная задача спектральной эллипсометрии по определению этих параметров решалась в два этапа. Вначале анализировался спектральный диапазон $2000\text{ нм} > \lambda > 1000\text{ нм}$, где оптические характеристики золота имеют монотонный спектр. В нем для функции $\varepsilon(\lambda)$ использовалась двухпараметрическая модель Коши, и методом наименьших квадратов определялись все шесть параметров модели. На втором этапе найденные значения n , τ , p_1 и p_2 (таблица 2) фиксировались, и при

каждом из экспериментальных значений λ решалось уравнение относительно ϵ , имеющее вид равенства теоретического и экспериментального отношений коэффициентов отражения для волн p - и s - поляризации (рисунок 3).

Таблица 2 - Параметры электронного газа в золотых пленках

d , нм	$\tau \cdot 10^{14}$, с	$n_0 \cdot 10^{28}$, 1/м ³	P_1	P_2
25	0.90	5.81	0.01	0.47
53	1.12	5.86	1.00	0.55
117	1.30	5.69	1.00	0.69

Видимый из таблицы 2 рост величин τ , p_1 , p_2 , сопровождающий увеличение d , можно связать с кристаллизацией золотых пленок по мере их роста. На рисунке 3 сопоставлены графики функций $\epsilon(\lambda)$ и комплексной диэлектрической проницаемости пленок $\epsilon_n(\lambda)$, найденной в приближении нормального скин-эффекта. В отличие от $\epsilon_n(\lambda)$, функция $\epsilon(\lambda)$ стабильна (в пределах погрешностей экспериментов) по отношению к толщине пленки. На основе полученных данных исследованы поля плазмонных мод в схеме Кречмана. Показано, что среди плазмонных сенсоров биологических растворов с конфигурацией Кречмана предпочтительны структуры с гладкими поверхностями, в которых $p_1 \rightarrow 1$.

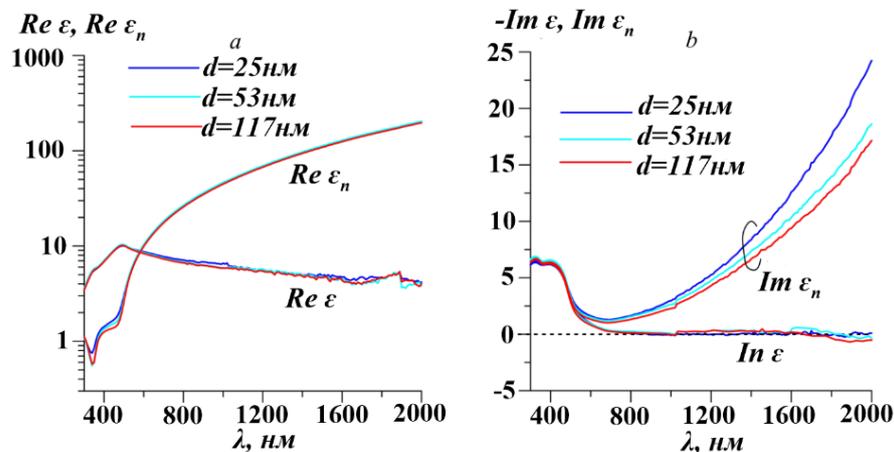


Рисунок 3 - Спектры действительной (а) и мнимой (b) частей диэлектрической проницаемости ионного остова и комплексной диэлектрической проницаемости золотых пленок различной толщины

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Получено решение векторной электродинамической задачи об описании распределения интенсивности когерентного светового пучка, отраженного от плоскостлой среды. На его основе определены условия наблюдения m -линий при отражении пучка от ультратонкого

диэлектрического слоя на подложке. Установлено, что контраст m -линий весьма чувствителен к толщине ультратонкого слоя. На этой основе предложен новый метод контроля толщины и показателя преломления ультратонких (наноразмерных) слоев (метод бесконтактной волноводной спектроскопии). Выполнен анализ погрешностей метода. Их сравнение с погрешностями стандартного метода когерентной плоскострунной рефлектометрии подтвердило преимущества развитого подхода. Выполнены эксперименты по наблюдению и обработке m -линий при решении обратной оптической задачи для оксидных слоев на поверхности кремния. Результаты определения показателей преломления и толщин слоев оказались в удовлетворительном согласии с независимыми данными многоугловой когерентной эллипсометрии [6, с. 268–270; 8; 9; 12; 13; 14; 17; 18; 19; 29; 33].

2. С позиций получения нулевых коэффициентов отражения от слоистых структур волн s -, либо p -поляризации за счет возбуждения в структурах бездиссипативных мод Ценнека исследована бинарная пленочная структура оксид кремния – палладий на призме связи из двуокиси циркония. Показано, что такая структура при ее использовании в качестве сенсора водорода в атмосфере может иметь более высокую по сравнению с плазмонными сенсорами спектральную чувствительность [5, с. 50–54; 6, с. 272; 10; 22; 23].

3. Исследован эффект резонансной связи основной моды кварцевого фотонно-кристаллического волокна с поглощающим тонкопленочным покрытием из двуокиси олова, нанесенным на поверхность оболочки волокна. С использованием строгого метода интегральных уравнений в теории фотонно-кристаллических волокон установлено, что в спектре пропускания волокна $T(\lambda)$ имеется резкий минимум, формирование которого объясняется резонансным усилением (на 3 порядка) амплитуды стоячей волны, образующейся между воздушными каналами волокна и покрытием [2, с. 2–3]. Локализация данного минимума на шкале длин волн определяется фазовым синхронизмом основной моды волокна с основными модами покрытия. Показано, что формирование на поверхности покрытия абсорбционного молекулярного слоя аммиака приводит к допускаяющему детектирование сдвигу координаты минимума функции $T(\lambda)$ [2, с. 11; 25; 31].

4. В результате анализа волновых уравнений для волн s - и p -поляризации в слоистой среде с произвольным пространственным профилем комплексной диэлектрической проницаемости получены соотношения взаимности для коэффициентов отражения и прохождения плоских волн при освещении слоистой среды во встречных направлениях. Показано, что энергетические коэффициенты прохождения встречных волн совпадают всегда, а для энергетических коэффициентов отражения подобное совпадение имеет место только при отсутствии в среде поглощения. На основе полученных

соотношений решены задачи оптимального синтеза интерференционных покрытий для поглотителя солнечной энергии и антибликовых элементов [3, с. 159–162; 4, с. 45–49; 26; 27; 28; 30; 32].

5. Сформулированы интегральные уравнения Фредгольма второго рода, описывающие аномальный скин-эффект в металлических пленках. Разработан алгоритм численного решения уравнений, основанный на методе квадратур. Рассчитаны оптические поля в алюминиевых, титановых и золотых пленках, возбуждаемых падающими на пленки волнами s - и p -поляризации, а также поля плазмонных мод в схеме Кречмана. Установлено, что компоненты электрического поля, параллельные границам металлических пленок, рассчитанные по моделям нормального и аномального скин-эффектов, практически совпадают. Для компоненты электрического поля, нормальной границам пленки, подобное совпадение имеет место только в глубине пленки. Вблизи ее границ модуль нормальной компоненты испытывает резкое усиление, зависящее от вероятности зеркального отражения электронов от данных границ. Разработана математическая модель спектральной эллипсометрии металлических пленок в условиях аномального скин-эффекта, где варьируемыми параметрами являются диэлектрическая проницаемость ионного остова металла, концентрация электронов проводимости, время релаксации и вероятности зеркального отражения электронов от границ пленки. На ее основе выполнена обработка экспериментальных данных спектральной эллипсометрии золотых пленок на кремниевой подложке. По сравнению со стандартной моделью нормального скин-эффекта развитый подход обеспечил более стабильные относительно толщин пленок решения обратной задачи спектральной эллипсометрии [1, с. 890–894; 7, с. 582–588; 11; 15; 16; 20; 21; 24; 34].

Рекомендации по практическому использованию результатов

В результате проведенных научных исследований соотношения взаимности используются на заводе «Диaproектор» (г. Рогачев) при диагностике оптических характеристик стеклянных пластин и в холдинге «Гомсельмаш» (г. Гомель) при проектировании антибликовых экранов для мониторов бортовых компьютеров. Техника расчета спектров энергетических коэффициентов отражения плоских волн от слоистых структур может быть использована в автомобильной промышленности при создании оптических сенсоров водорода, применяемых в двигателях внутреннего сгорания, использующих водород в качестве топлива. Полученные фундаментальные результаты для оптических характеристик наноразмерных металлических пленок могут быть использованы в министерстве здравоохранения с целью совершенствования оптического контроля состава биологических растворов.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях:

1. Сотский, А. Б. Эллипсометрия металлических пленок в условиях аномального скин-эффекта / А. Б. Сотский, Е. А. Чудаков, Л. И. Сотская // Оптика и спектроскопия. – 2021. – Т. 129, № 7. – С. 889–898.
2. Lossy mode resonances in photonic crystal fibers / M. S. Sicacha, V. P. Minkovich, A. B. Sotsky, A. V. Shilov, L. I. Sotskaya, E. A. Chudakov // Journal of the European Optical Society: Rapid Publications. – 2021. – Vol. 17, № 1. – P. 1–12.
3. Сотский, А. Б. Соотношение взаимности для интерференционных покрытий / А.Б. Сотский, Е.А. Чудаков // Известия НАН Беларуси, Сер. физ.-матем. наук. – 2022. – Т. 59, № 2. – С. 158–167.
4. Сотский, А. Б. Соотношения взаимности для слоистых сред / А. Б. Сотский, Е. А. Чудаков // Веснік Магілёўскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А. А. Куляшова. Серыя В. Прыродазнаўчыя навукі: матэматыка, фізіка, біялогія. – 2023. – Т. 61, № 1. – С. 40–50.
5. Сотский, А. Б. Нулевое отражение света от неоднородного слоя / А. Б. Сотский, Е. А. Чудаков // Веснік Магілёўскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А. А. Куляшова. Серыя В. Прыродазнаўчыя навукі: матэматыка, фізіка, біялогія. – 2023. – Т. 62, № 2. – С. 45–56.
6. Метод m-линий при рефлектометрии ультратонких слоев / А. Б. Сотский, Е. А. Чудаков, А. В. Шилов, Л. И. Сотская // ЖТФ. – 2024. – Т. 94, № 2. – С. 267–277.
7. Сотский, А.Б. Аномальный скин-эффект в металлических пленках / А. Б. Сотский, Е. А. Чудаков, Л. И. Сотская // ЖПС. – 2024. – Т.91, № 2. – С. 581–593.

Статьи в сборниках научных трудов конференций:

8. Парашков, С. О. Электродинамика поглощающей призмы связи / С. О. Парашков, А. Б. Сотский, Е. А. Чудаков // Оптика неоднородных структур – 2019 : материалы V Международной научной конференции, Могилев, 28–29 мая 2019 года ; Редколлегия: А. Б. Сотский [и др.]. – Могилев: Могилевский государственный университет имени А.А. Кулешова, 2019. – С. 105–110.
9. Стабилизация точки ввода излучения в оптический волновод в призмном устройстве связи / С. О. Парашков, А. Б. Сотский, Е. А. Чудаков, С. А. Багуцкий, Е. В. Ермакова, А. В. Януков // Энергетика, информатика, инновации - 2019 : сборник трудов IX Международной научно-технической конференции. В 2-х т., Смоленск, 17–18 октября 2019 года. Том 1. – Смоленск: – Универсум, 2019. – С. 506–509.

10. Чудаков, Е. А. Нулевое отражение световых волн от призмы связи при возбуждении слоистой среды / Е. А. Чудаков, В.Г. Кручков, А. Б. Сотский // Проблемы взаимодействия излучения с веществом материалы конференции посвященной 110-летию со дня рождения Ф.И. Федорова редкол.: С. А. Хахомов (гл. ред.) [и др.]. – Электронные текстовые данные (12 МБ). – Гомель – ГГУ им. Ф. Скорины, 25 июня 2021. - С. 375–377.

11. Investigation of Optical Characteristics of In₂S₃ Thin Films by Spectroscopic Ellipsometry and Spectrophotometry Methods / N. I. Staskov, V. F. Gremenok, E. A. Chudakov, N. Akcaay, S. Ozcelik // 3rd International Conference on Light and Light-based Technologies, Ankara, Turkey, May 25–27, 2022. – P. 87–88.

12. Рефлектометрия слоя сфокусированным световым пучком / Е. А. Чудаков, А. Б. Сотский, А. В. Шилов, С. О. Парашков // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния материалы седьмой Междунар. науч.-практ. конф. 18–19 мая 2023 г., Минск, М-во образования Респ. Беларусь, НИУ «Ин-т приклад. физ. проблем им. А.Н.Севченко» Беларус. гос. ун-та; редкол.: Ю. И. Дудчик (гл. ред.), И. М. Цикман, И. Н. Кольчевская. – Минск, 2023. – С. 108–110.

13. Распределение эрбия по толщине золь-гель пленок титаната бария / Н. И. Стаськов, Е. И. Лашковская, Н. В. Гапоненко, Ю. Д. Корнилова, А. А. Омельченко, В. А. Пилипенко, Е. А. Чудаков, А. Б. Сотский, Л. И. Сотская, А. А. Бойко, А. В. Семченко // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния материалы седьмой Междунар. науч.-практ. конф. 18–19 мая 2023 г., Минск, М-во образования Респ. Беларусь, НИУ «Ин-т приклад. физ. проблем им. А.Н.Севченко» Беларус. гос. ун-та; редкол.: Ю. И. Дудчик (гл. ред.), И. М. Цикман, И. Н. Кольчевская. – Минск, 2023. – С. 366–368.

14. Оптические характеристики отожженных золь-гель пленок оксида кремния, чистых и легированных лантаноидами пленок титаната бария на кремниевых подложках / Н. И. Стаськов, Е. А. Чудаков, А. Б. Сотский, Л. И. Сотская, Н. В. Гапоненко, Е. И. Лашковская, А. К. Лаврентьев // Квантовая электроника [Электронный ресурс] : материалы XIV Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 21–23 нояб. 2023 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: М. М. Кугейко (гл. ред.), А. А. Афоненко, А. В. Баркова. – Минск : БГУ, 2023. – С. 128–132.

15. Чудаков, Е. А. Электродинамика плазмонных мод металлических пленок / Е. А. Чудаков, А. Б. Сотский, Л. И. Сотская // Квантовая электроника [Электронный ресурс] – материалы XIV Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 21–23 нояб. 2023 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: М. М. Кугейко (гл. ред.), А. А. Афоненко, А. В. Баркова. – Минск : БГУ, 2023. – С. 227–231.

16. Чудаков, Е. А. Спектральная эллипсометрия золотых пленок / Е. А. Чудаков, А. Б. Сотский, Л. И. Сотская // Современные методы и приборы контроля качества диагностики состояния объектов : сб. ст. 9-й Междунар. науч.-техн.конф. – Могилев : Беларус.-Рос. ун-т, 2024. – С. 237–240.

Тезисы докладов

17. Парашков, С. О. Стабилизация точки ввода излучения в планарную структуру посредством призмы связи / С. О. Парашков, А. Б. Сотский, Е. А. Чудаков // материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : Материалы Международной научно-технической конференции, Могилев, 25–26 апреля 2019 года ; редколлегия: М.Е. Лустенков [и др.]. – Могилев : Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», 2019. – С. 319–320.

18. Чудаков, Е. А. Оптимизация установки волноводной спектроскопии / Е. А. Чудаков, С. А. Багуцкий // Молодая наука – 2019 : материалы конференции, Могилев, 25 апреля 2019 года ; ответственный редактор О. Л. Лавшук. – Могилев : Могилевский государственный университет имени А.А. Кулешова, 2019. – С. 113.

19. Волноводная спектроскопия структуры ZrO_2-SiO_2-Si / С. А. Багуцкий, Е. В. Ермакова, А. В. Януков, Е. А. Чудаков // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Международной научно-технической конференции молодых ученых, Могилев, 24–25 октября 2019 года ; редколлегия: М. Е. Лустенков [и др.]. – Могилев : Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», 2019. – С. 154.

20. Сотский, А. Б. Метод интегральных уравнений в теории аномального скин-эффекта / А. Б. Сотский, Е. А. Чудаков, Л. И. Сотская // Материалы внутривузовской научно-методической конференции преподавателей и сотрудников по итогам научно-исследовательской работы, 28 января – 12 февраля 2021 г. ; под ред. Н. В. Маковской, Е. К. Сычовой. – Могилев : МГУ им. А.А. Кулешова, 2021. - С.110–112.

21. Чудаков, Е. А. Задача многоугловой эллипсометрии металлической пленки при диффузном рассеянии электронов на ее границах / Е. А. Чудаков, А. Б. Сотский // Актуальные вопросы физики и техники : материалы X Республиканской научной конференции студентов, магистрантов и аспирантов / М-во образования Республики Беларусь, Гомельский гос. ун-т им Ф. Скорины ; редкол. : Д.Л. Коваленко (гл. руд.) [и др.]. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2021. – С. 342–344.

22. Чудаков, Е. А. Резонансное отражение света от диссипативной пленочной структуры TiO_2-Pd На кварцевой подложке / Е. А. Чудаков, В. Г.

Кручков // Молодая наука – 2021 : Региональная научно-практическая конференция студентов и аспирантов вузов Могилевской области : материалы конференции, 22 апреля 2021 г. ; под ред. О. А. Лавшук, Н. В. Маковской. Могилев: МГУ имени А.А. Кулешова, 2021. – С. 111–112.

23. Кручков, В. Г. Моде Ценнека в бинарном металлическом слое Cr-Au / В. Г. Кручков, Е. А. Чудаков // Молодая наука – 2021: Региональная научно-практическая конференция студентов и аспирантов вузов Могилевской области : материалы конференции, 22 апреля 2021 г. ; под ред. О. А. Лавшук, Н. В. Маковской. Могилев: МГУ имени А.А. Кулешова, 2021 – С. 97–98.

24. Чудаков, Е. А. Плазмонные моды металлических пленок при аномальном скин-эффекте / Е. А. Чудаков, А. Б. Сотский, С. О. Парашков // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т ; редкол. : М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2021. – С.306–307.

25. Computer simulation of modal characteristics of photonic crystal fibers with a layered coating / D. Ponkratov, E. Chudakov, A. Sotsky, V. Minkovich // Нанопроектирование, технология, компьютерное моделирование (NDTCS-2021) : тезисы докладов XIX Международного симпозиума, Минск, 28-29 октября 2021 года / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; редкол.: В. А. Богуш [и др.]. – Минск, 2021. – Р. 13–15.

26. Расчет антибликового покрытия экрана бортового компьютера / Н. И. Стаськов, Н. Н. Федосенко, А. С. Шантыко, А.Б. Сотский, Е. А. Чудаков, Д. В. Понкратов, Е.А. Кулеш // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе: сборник тезисов докладов пятой международной научно-практической конференции / Министерство промышленности Республики Беларусь. – Гомель, 2021. – С. 200 – 201.

27. Минимизация отражения естественного света от диэлектрической пластины с антибликовым покрытием / Е. А. Чудаков, А. Б. Сотский, Д. В. Понкратов, Н. И. Стаськов // Итоги научных исследований ученых МГУ имени А. А. Кулешова 2021 г. : материалы научно-методической конференции ; Под редакцией Н. В. Маковской, Е. К. Сычовой. – Могилев: Могилевский государственный университет имени А.А. Кулешова, 2022. – С. 103–105.

28. Сотская, Л. И. Задача спектрофотометрии растущего слоя / Л. И. Сотская, Е. А. Чудаков, А. Б. Сотский // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Международной научно-технической конференции, Могилев, 21–22 апреля 2022 года ; редколлегия: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», 2022. – С. 417–418.

29. Шульга, А. А. Оптические характеристики пленок титаната бария с эрбием / А. А. Шульга, Е. А. Чудаков, Н. И. Стаськов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : Материалы Международной научно-технической конференции, Могилев, 21–22 апреля 2022 года ; редколлегия: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», 2022. – С. 344–345.

30. Чудаков, Е. А. Теорема взаимности для интерференционных покрытий / Е. А. Чудаков // Химия, физика, биология: пути интеграции : Сборник тезисов докладов IX Всероссийской научной молодежной школы-конференции, Москва, 20–22 апреля 2022 года. – Москва: Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет), 2022. – С. 184.

31. Понкратов, Д. В. Метод функций Грина в теории фотонно-кристаллических волокон / Д. В. Понкратов, А. Б. Сотский, Е. А. Чудаков // сборник тезисов II международной научно-технической конференции «ОПТО-, МИКРО- И СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКА – 2022». – Минск, 2022. – С. 69.

32. Стаськов, Н. И. Антибликовое двухстороннее покрытие стеклянной пластины / Н. И. Стаськов, Е. А. Чудаков, Н. В. Гапоненко // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т ; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2023. – С. 356–357.

33. Парашков, С. О. Рефлектометрия слоя ограниченным световым пучком / С. О. Парашков, Е. А. Чудаков, А. Б. Сотский // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т ; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2023. – С. 342–343.

34. Сотская, Л. И. Ограничения модели Друде при спектрофотометрии золотых пленок / Л. И. Сотская, Е. А. Чудаков, А. Б. Сотский // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Международной научно-технической конференции, Могилев, 25–26 апреля 2024 г. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т ; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2024. – С. 314–316.

РЕЗЮМЕ

Чудаков Евгений Александрович

Новые методы оптической диагностики тонких пленок

Ключевые слова: поглощающая призма связи, мода Ценнека, m -линия, соотношения взаимности, аномальный скин-эффект, плазмонная мода, спектральная эллипсометрия

Цель диссертационной работы состоит в выяснении принципиальных ограничений стандартной волноводной спектроскопии тонких пленок, в разработке нового метода бесконтактной (беспризменной) волноводной спектроскопии, в развитии электродинамических моделей диэлектрических и металлодиэлектрических слоистых структур.

Методы исследования: аналитические, численные.

Полученные результаты и их новизна.

– Определены условия наблюдения m -линий при решении векторной электродинамической задачи для распределения интенсивности при отражении гауссова пучка от ультратонкой (наноразмерной) пластины на подложке.

– Путем решения дисперсионных уравнений для неоднородных сред определены условия существования бездиссипативных мод Ценнека, допускающие возбуждение при углах нулевого отражения;

– Получены оценки спектров пропускания волоконно-оптических сенсоров аммиака в воздухе, использующих эффект резонансной связи мод в кварцевых фотонно-кристаллических волокнах с поглощающими полимерными покрытиями;

– Получены общие соотношения взаимности для коэффициентов отражения и пропускания электромагнитных волн s - и p -поляризации при освещении плоскостройной структуры с неоднородной комплексной диэлектрической проницаемостью со встречных направлений;

– Разработан метод интегральных уравнений в теории аномального скин-эффекта для расчета оптических полей и параметров электронного газа металлических пленок при произвольной вероятности зеркального отражения электронов от ее границ.

Рекомендации по использованию и область применения. Результаты исследования могут быть использованы в министерствах промышленности, связи и информатизации при усовершенствовании методов оптического контроля тонкопленочных покрытий, при создании оптимизированных сенсоров параметров сред, а также для совершенствования содержания учебного материала в интересах министерства образования.

РЭЗІЮМЭ

Чудакоў Яўгеній Аляксандравіч

Новыя метады аптычнай дыягностыкі тонкіх плёнак

Ключавыя словы: паглынальная прызма сувязі, мода Цэнека, m -лінія, суадносіны ўзаемнасці, анамальны скін-эфект, плазмонная мода, спектральная эліпсаметрыя

Мэта дысертацыйнай працы складаецца ў высвятленні прынцыповых абмежаванняў стандартнай хваляводнай спектраскапіі тонкіх плёнак, у распрацоўцы новага метаду бескантактавай (беспрызменнай) хваляводнай спектраскапіі, у развіцці электрадынамічных мадэляў дыэлектрычных і металадыэлектрычных слаістых структур.

Метады даследавання: аналітычныя, лікавыя.

Атрыманыя вынікі і іх навізна:

- Вызначаны ўмовы назірання m -ліній пры рашэнні вектарнай электрадынамічнай задачы для размеркавання інтэнсіўнасці пры адлюстраванні гаўсавага пучка ад ультратонкай (нанапамернай) пласціны на падкладцы.

- Шляхам рашэння дысперсійных ураўненняў для неаднародных асяроддзяў вызначаны ўмовы існавання бездысіпатыўных мод Цэнека, якія дапускаюць узбуджэнне пры вуглах нулявога адлюстравання;

- Атрыманы ацэнкі спектраў прапускання валаконна-аптычных сэнсараў аміяку ў паветры, якія выкарыстоўваюць эфект рэзананснай сувязі мод у кварцавых фатонна-крышталічных валокнах з паглынальнымі палімернымі пакрыццямі;

- Атрыманы агульныя суадносіны ўзаемнасці для каэфіцыентаў адлюстравання і прапускання электрамагнітных хваль s - і p -палярызацыі пры асвятленні плоскаслаістай структуры з неаднароднай комплекснай дыэлектрычнай пранікальнасцю з сустрэчных напрамкаў;

- Распрацаваны метады інтэгральных ураўненняў у тэорыі анамальнага скін-эфекту для разліку аптычных палёў і параметраў электроннага газу металічных плёнак пры адвольнай верагоднасці люстранога адлюстравання электронаў ад яе меж.

Рэкамендацыі па выкарыстанні і вобласць ужывання. Вынікі даследавання могуць быць выкарыстаны ў міністэрствах прамысловасці, сувязі і інфарматызацыі пры ўдасканаленні метадаў аптычнага кантролю тонкаплёначных пакрыццяў, пры стварэнні аптымізаваных сэнсараў параметраў асяроддзя, а таксама для ўдасканалення зместу навучальнага матэрыялу ў інтарэсах міністэрства адукацыі.

SUMMARY

Chudakov Evgeniy Alexandrovich

New methods of optical diagnostics of thin films

Keywords: *prism-absorbing coupling, Zenneck mode, m-line, reciprocity relations, anomalous skin effect, plasmonic mode, spectral ellipsometry*

The aim of the dissertation is to clarify the fundamental limitations of standard waveguide spectroscopy of thin films, to develop a new method of contactless (prism-free) waveguide spectroscopy, and to develop electrodynamic models of dielectric and metal-dielectric layered structures.

Methods of the study: analytical, numerical.

The results obtained and their novelty:

– The conditions for observing m-lines were determined when solving a vector electrodynamic problem for the intensity distribution during reflection of a Gaussian beam from an ultra-thin (nanoscale) plate on a substrate.

– The conditions for the existence of dissipative-free Zenneck modes allowing excitation at zero reflection angles were determined by solving dispersion equations for inhomogeneous media;

– The transmission spectra of fiber-optic ammonia sensors in air were estimated using the effect of resonant mode coupling in quartz photonic crystal fibers with absorbing polymer coatings;

– The general reciprocity relations were obtained for the reflection and transmission coefficients of s- and p-polarized electromagnetic waves when illuminating a flat-layered structure with inhomogeneous complex permittivity from opposite directions;

– A method of integral equations in the theory of anomalous skin effect has been developed for calculating optical fields and parameters of the electron gas of metal films with an arbitrary probability of specular reflection of electrons from its boundaries;

Recommendations for use and scope of application. The results of the study can be used in the ministries of industry, communications and information in improving methods of optical control of thin-film coatings, in creating optimized sensors for environmental parameters, as well as in improving the content of educational material in the interests of the Ministry of Education.



Подписано в печать 16.12.2024. Формат 60x84/16.
Гарнитура – «Times New Roman». Усл.-печ. л. 1,6.
Уч.-изд. л. 1,8. Тираж 60 экз. Заказ №236.

Учреждение образования «Могилевский государственный университет
имени А. А. Кулешова», 212022, Могилев, Космонавтов, 1.
Свидетельство ГРИИРПИ № 1/131 от 03.01.2014 г.

Отпечатано в издательском отделе
МГУ имени А. А. Кулешова, 212022, Могилев, Космонавтов, 1