

На правах рукописи

ХАСАНОВ ТОХИР

**ПОЛЯРИМЕТРИЯ И ЭЛЛИПСОМЕТРИЯ В ИССЛЕДОВАНИИ ПОЛЯРИЗУЮЩИХ
ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

01.04.05 «Оптика»

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Новосибирск – 2010

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте физики
полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН

Научный консультант доктор физико-математических наук, профессор
Пчеляков Олег Петрович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Малиновский Валерий Константинович

доктор физико-математических наук, профессор
Курышев Георгий Леонидович

доктор физико-математических наук, профессор
Шеманин Валерий Геннадьевич

Ведущая организация Учреждение Российской академии наук Институт
физики им. Л.В. Киренского СО РАН

Защита состоится _____ на заседании диссертационного
совета Д 003.005.01 в Институте автоматике и электротехники СО РАН, 630090, Новосибирск,
проспект академика Коптюга, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института автоматике и электротехники
СО РАН.

Автореферат разослан _____ 2010 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
д.ф.-м.н.

Насыров К. А.

Общая характеристика работы

Многослойные изотропные или анизотропные планарные объекты являются типичными примерами отражающих поляризующих оптических систем (ПОС). Простейшими примерами таких объектов являются изотропные и анизотропные подложки, т.е. объемные материалы (жидкие и твердые тела). Вторыми по сложности являются системы, состоящие из таких подложек (тел) с изотропными или анизотропными пленками на поверхности. Естественно, что на поверхности любого физического объекта, будь это кристалл или аморфное тело, наличие поверхностной пленки неизбежно.

Надо подчеркнуть, что неоднородность и анизотропия являются общими свойствами любого вещества, и только при определенных условиях или приближениях оно может считаться изотропным. Это положение касается не только объемных материалов, но и наноразмерных слоев или границы раздела двух сред. В частности, в качестве яркого примера можно назвать пленки Ленгмюра-Блоджетт, которые считались изотропными. То же самое относится и к диэлектрическим пленкам типа SiO_2 , TiO_2 и т.д.

Исторически **эллипсометрия** возникла как оптический метод исследования поверхности жидких и твердых тел и измерения параметров тонких пленок на них. Поэтому под термином **эллипсометрия** в настоящее время подразумевается изменение состояний эллипса поляризации (СЭП) светового пучка вследствие отражения. Под термином **поляриметрия** понимается изменение СЭП светового пучка вследствие прохождения.

В 1976 г. на III международной конференции по эллипсометрии (Небраска, США) обсуждались вопросы выработки понятийного аппарата, связанного с поляриметрией и эллипсометрией. Однако до сих пор многие понятия, термины, призванные раскрыть особенности взаимодействия поляризованной электромагнитной волны (света) с веществом, запутаны, допускаются при этом неправильные трактовки отражения и пропускания. Поэтому, как считает автор данной диссертационной работы, давно назрела необходимость уточнения всей терминологии, используемой в этой области исследований.

Следует отметить, что исследования в области эллипсометрии (поляриметрии) и исследования анизотропных свойств веществ тесно переплетаются и взаимно дополняют друг друга. Именно благодаря анизотропным свойствам веществ была открыта поляризация света. Так в различных сферах науки и техники нашли широкое применение оптические элементы и устройства из природных и искусственных монокристаллов, большинство из которых являются анизотропными. Поэтому именно сочетание (комбинация) методов, используемых в поляриметрии и эллипсометрии, открывает принципиально новые возможности в исследовании как пропускающих, так и отражающих систем. Эта позиция автора является исходной и проходит лейтмотивом по всей диссертации.

Актуальность темы диссертационного исследования обусловлена тем, что изменения состояния эллипса поляризации могут быть вызваны эффектами оптической анизотропии (ЭОА) как в отражающих, так и в пропускающих оптических системах. Неразрешимыми и неразличимыми оставались проблемы разделения или устранения этих эффектов от каждого оптического элемента **эллипсометра** (прибора для измерения изменений СЭП). Поэтому для адекватного описания характеристики исследуемой системы принципиально важно разделение этих взаимосвязанных ЭОА. Заметим, что любая ПОС имеет свои, характерные для конкретной оптической системы, собственные поляризации. Для разделения ЭОА отражающей и пропускающей системы необходимо определение собственных СЭП каждого элемента оптической системы.

При исследовании анизотропных систем необходимо получение однозначных и точных измерений поляризационных углов из одного набора показаний лимбов оптических элементов эллипсометра. Это обстоятельство налагает жесткие дополнительные требования к параметрам компенсатора и поляризатора, которые сами по себе являются анизотропными оптическими элементами эллипсометра или ПОС и объектами исследования.

Необходимо отметить важность следующих моментов приложения методов эллипсометрии:

- определение оптических констант (показателей преломления и затухания) материалов методом эллипсометрии является наиболее универсальным и эффективным в отличие от известных методов, имеющих те или иные ограничения. Для металлов, полупроводников и тонких пленок эллипсометрия является основным средством определения оптических постоянных. Очевидно, что эллипсометрия анизотропных сред существенно отличается от эллипсометрии изотропных сред и охватывает значительно больший круг вопросов как в теоретическом, так и в экспериментальном плане;
- для адекватного описания свойств любых исследуемых систем, особенно анизотропных, и реализации теоретической предельной точности эллипсометрии в определении поляризационных углов необходимо максимально исключить систематические и случайные ошибки измерения. Основными источниками ошибок являются неточная юстировка эллипсометра и несовершенство оптических элементов;
- в нанoeлектронике актуальной является проблема одновременного определения показателя преломления и толщины тонких (вплоть до единиц нм) диэлектрических пленок на поверхности. До сих пор при определении физических параметров тонких пленок ошибочно используется объемное значение показателя преломления диэлектрической пленки, что зачастую приводит к абсурду;

- в публикациях, посвященных определению оптических констант, к моменту начала данной работы не были в полной степени реализованы теоретические возможности эллипсометрии. Для заведомо прозрачных кристаллов были получены ошибочно большие значения показателей затухания для прозрачных сред при практически полном отсутствии затухания. Надо заметить, что и в настоящее время часто используется понятие «псевдоконстанты». Более того, нет четкого определения понятий показателей преломления и затухания для наноразмерных слоев и кристаллов. Несмотря на то, что существует огромное число работ, посвящённых учету влияния несовершенств параметров компенсатора, поляризатора, анализатора и других оптических элементов эллипсометра на результаты эллипсометрических исследований, до сих пор отсутствует единое систематизированное рассмотрение данного вопроса.

Объектом диссертационной работы являются отражающие и пропускающие оптически изотропные и анизотропные системы, эффекты оптической анизотропии и состояния эллипса поляризации электромагнитной волны при ее взаимодействии с этими системами.

Предметом исследования являются оптически изотропные и анизотропные среды (одноосные кристаллы), тонкие пленки на их поверхности, оптически активные среды.

В качестве **методологического подхода** используются разные математические представления СЭП и взаимодействия поляризованного света с изотропными и анизотропными системами преимущественно на основе представления СЭП в комплексной плоскости.

Степень разработанности темы. Последовательное изложение явления отражения и пропускания света изотропными и анизотропными кристаллами на основе волновой теории впервые было выполнено О.Ж. Френелем.

Одной из главных задач в работах П. Друде была проверка теории, разработанной О.Ж. Френелем. Ему удалось эта работа. Однако интерпретация экспериментальных оптических данных, полученных при отражении света от границы раздела двух сред, со времен О.Ж. Френеля и по настоящее время остается предметом дискуссии. Этому вопросу, кроме Дж. С. Релея и П. Друде, уделяли должное внимание видные отечественные и зарубежные ученые. В силу широкого прикладного применения явлений при отражении электромагнитной волны и неоднозначных подходов к их изучению наибольшее распространение получила эллипсометрия. Об этом красноречиво свидетельствуют международные, всесоюзные и всероссийские конференции по эллипсометрии. Все возрастающее число публикаций, так или иначе связанных с исследованием изменения СЭП

электромагнитной волны при отражении от поверхности ПОС, также показывает недостаточную разработанность этой проблемы.

Исследования кристаллов на основе отражения или пропускания и эффектов анизотропии для разных школ развивались самостоятельно и при этом использовались разные теоретические описания. Например, ковариантные методы, разработанные Ф.И. Федоровым и развитые его учениками, получили применение в решении многих теоретических и практических задач кристаллооптики. В работах Р. Аззама и Н. Башара эффективно используется представление СЭП с помощью комплексной плоскости, предложенной еще Пуанкаре. С другой стороны, наглядное представление СЭП с помощью сферы Пуанкаре актуально в науке до сих пор.

Многие вопросы оставались неразрешенными именно вследствие отсутствия сочетания (комбинации) поляриметрии и эллипсометрии. До начала настоящей диссертационной работы многие артефакты поляриметрии переносились на отражающую систему. Поэтому, несмотря на большое количество теоретических и модельных экспериментальных работ, интерпретация натуральных экспериментальных результатов оставалась дискуссионной.

Цели и направления диссертационной работы

1. Разработка путей решения разделения ЭОА в пропускающих и отражающих поляризующих оптических системах.

2. Определение собственных поляризаций изотропных и анизотропных оптических систем для реализации адекватного описания свойств исследуемых систем, особенно анизотропных.

3. Достижение теоретической предельной точности эллипсометрии в определении поляризационных углов, максимальном исключении систематических и случайных ошибок измерения в определении оптических параметров ПОС.

Для осуществления этих целей в диссертационной работе решаются следующие задачи:

1. Исследование изменения СЭП света при его прохождении через оптические изотропные и анизотропные системы и отражении от них. Анализ основан на принципиальном понимании необходимости сочетания (комбинации) поляриметрии и эллипсометрии (СПЭ).

2. Экспериментальное определение собственных поляризаций изотропных и анизотропных ПОС без предварительного знания элементов матрицы отражения и пропускания (матрицы Джонса).

3. Выявление особенностей прохождения поляризованного света через все оптические элементы эллипсометра и причин возникновения фона неполяризованной компоненты, остаточной эллиптичности и их устранение.

4. Определение максимальной поляризующей способности поляризаторов. Выбор поляризаторов, у которых на выходе достигается минимальная эллиптичность СЭП светового пучка.

5. Определение оптических параметров анизотропных кристаллов с максимальной точностью на основе СПЭ.

6. Выявление истинных причин невыполнения зонных соотношений и их устранение для измерительных зон эллипсометра (ИЗЭ). Определение и устранение возникающих разностей в ИЗЭ. Эффективное использование ИЗЭ для обнаружения недиагональных элементов матрицы отражения и пропускания (матрицы Джонса) ПОС. Обнаружение слабой анизотропии в объемных средах (подложках) и наноразмерных слоях.

7. Определение показателя преломления (n_1) и толщины (d_1) пленки на одноосной кристаллической подложке с одновременным определением показателей преломления обыкновенной (n_o) и необыкновенной (n_e) волн в подложке.

8. Определение показателей преломления (n_{o1}, n_{e1}) и затухания (k_{o1}, k_{e1}) для обыкновенной и необыкновенной волн в одноосной кристаллической пленке, а также толщины пленки (d_1), при известном показателе преломления подложки (n_1).

9. Решение проблемы одновременного и однозначного определения показателя преломления и толщины наноразмерных слоев с использованием свойств анизотропных (одноосных) кристаллов.

10. Определение показателей преломления и затухания в наноразмерных слоях и в их фазовых компонентах.

Научная новизна. Разработано и обосновано научное направление в исследовании анизотропных оптических систем, учитывающее особенности как поляриметрии, так и эллипсометрии, качественно изменившее возможности этих оптических методов. Разработан метод, сочетающий поляриметрию и эллипсометрию, при котором пропускающий элемент является объектом исследования, а отражающая система выступает в качестве вспомогательного элемента.

Сформулирована и доказана теорема, заключающаяся в том, что инвариантные точки дробно-линейной функции с комплексными коэффициентами определяются без предварительного знания этих коэффициентов. Для этого достаточно наличия двух последовательностей чисел, связанных некоторым иным дробно-линейным отображением, и таких, что пары соседних чисел в каждой последовательности отвечают ортогональным поляризациям.

В русле предлагаемого научного направления СПЭ разработаны, обоснованы и экспериментально реализованы:

- метод измерения показателей преломления одноосных кристаллов с точностью до 10^{-5} и чувствительностью до 10^{-7} и толщины плоскопараллельной пластинки с точностью до единиц нм;
- метод измерения малых вращений плоскости поляризации оптически активной среды (порядка угловой секунды и меньше);
- метод одновременного определения линейного дихроизма и двулучепреломления в плоскопараллельной пластинке из одноосного кристалла непосредственно из показаний лимбов поляризатора и анализатора при наличии оптической активности;
- метод измерения неполяризованной компоненты, возникающей при прохождении линейно поляризованного света через непросветленную плоскопараллельную анизотропную пластинку;
- метод определения собственных поляризаций изотропных и анизотропных оптических систем при неизвестных элементах матрицы отражения и пропускания (матрицы Джонса);

В эллипсометрическом методе разработаны, теоретически обоснованы и экспериментально реализованы:

- алгоритм решения и метод одновременного определения показателей преломления одноосного кристалла (n_o , n_e) пленки (n_1) и ее толщины (d_1) для оптической отражающей системы, состоящей из прозрачной изотропной пленки на одноосном кристалле;
- алгоритм решения и метод одновременного определения показателей преломления одноосной кристаллической пленки (n_{o1} , n_{e1} , k_{o1} , k_{e1}) и ее толщины (d_1) для оптической отражающей системы, состоящей из одноосной кристаллической пленки на прозрачной изотропной подложке.

Из результатов эллипсометрии получены реальные значения обыкновенного и необыкновенного показателей преломления объемной фазы прозрачных одноосных кристаллов, а не «псевдоконстанты» показателей преломления и показателей затухания. Тем самым разрушены привычные устоявшиеся представления о том, что из эллипсометрии возможно определять только «псевдоконстанты» этих показателей.

Исследована оптическая анизотропия пленок Ленгмюра-Блоджетт (ЛБ) пентакоза - 10,12-диинвой кислоты (ДА-11-8) после полимеризации методами эллипсометрии на отражение и пропускание. На основе СПЭ установлено, что направление вытягивания пленки ЛБ лежит в главной плоскости, а анизотропия обусловлена преимущественно дихроизмом.

На основе применённого подхода СПЭ:

- ♦ обнаружена и измерена неполяризованная компонента, которая возникает при прохождении линейно поляризованного света через непросветленную анизотропную плоскопараллельную пластинку. Установлено, что интенсивность неполяризованной

компоненты зависит от значения сдвига фаз δ , который приобретает световой пучок при прохождении через анизотропную пластинку и от величины азимута вектора электрического поля γ относительно ее оптической оси. Интенсивность неполяризованной компоненты увеличивается по мере увеличения значений δ в интервале от 0 до $\pi/2$ и от π до $3\pi/2$. В интервале от $\pi/2$ до π и от $3\pi/2$ до 2π интенсивность уменьшается. Она также увеличивается по мере приближения γ к значениям $(2m+1)\pi/4$. Для всех значений γ , равных 0 или кратных $\pi/2$, независимо от значений δ , величина неполяризованной компоненты практически равна нулю. Величина неполяризованной компоненты максимальна при $\delta=\pi/2, 3\pi/2$, и $\gamma=(2m+1)\pi/4$ ($m=0,1,2$);

♦ измерены значения показателей преломления обыкновенной и необыкновенной волн (с точностью до 10^{-5} и чувствительностью до 10^{-7}) и толщина пластинки (с точностью до 1 нм) искусственного кристаллического кварца в зависимости от температуры. Из полученных значений показателей преломления для обыкновенной и необыкновенной волн одноосного кристалла определены их температурные коэффициенты, а из зависимости от температуры значений толщины пластинки получен коэффициент температурного расширения;

♦ установлено, что температурные коэффициенты показателей преломления для искусственного и природного кристаллического кварца заметно отличаются.

В качестве приложений эллипсометрии также получены следующие результаты.

1. Из результатов исследования отжига слоев SiO_2 при формировании в них светоизлучающих нанокристаллов Si прослежено, что эллипсометрия четко реагирует на изменения оптических констант слоев на каждом шаге отжига во всем изученном интервале температур. В приближении Бруггемана вычислены изменения оптических параметров избыточной фазы Si и обнаружено, что они соответствуют отдельным стадиям формирования нановыделений.

2. Установлено, что для широко используемых в микро- и нанoeлектронике пленок SiO_2 толщиной меньше 20 нм наблюдается зависимость эффективного показателя преломления от толщины. Обнаружено, что по мере уменьшения толщины пленки уменьшается ее показатель преломления. Объяснение истинной причины зависимости (уменьшение показателя преломления от толщины пленки) затруднено. Оно обусловлено влиянием реальной структуры поверхности подложки и качеством её подготовки.

3. Также установлена аналогичная зависимость для пленок TiO_2 , широко используемых в различных областях науки и техники, включая медицину. Причина этой зависимости для пленок TiO_2 обусловлена изменением кристаллической структуры пленок от толщины.

Теоретическая и практическая значимость работы. Сформулированная и доказанная теорема об инвариантных точках дробно-линейной функции с комплексными коэффициентами была использована в решении конкретной задачи эллипсометрии – определении собственных поляризаций изотропных и анизотропных оптических систем без предварительного знания элементов матрицы пропускания и отражения (матрицы Джонса). Она является полезной и эффективной при решении определенных задач не только эллипсометрии, но и в других разделах оптики.

Разработанный и экспериментально подтвержденный подход СПЭ позволяет:

С измерить значения малых вращений плоскости поляризации в оптически активной среде с точностью до нескольких угловых секунд с минутными угломерными устройствами;

С обнаружить и измерить неполяризованную компоненту, возникающую при прохождении линейно поляризованного света через плоскопараллельную анизотропную пластинку. В частности, этот подход позволил достаточно просто и одновременно определить два параметра (двулучепреломление и дихроизм в пленках ЛБ).

Этот подход является полезным и эффективным для исследования других подобных объектов.

Предложенные варианты компенсации позволяют создать современные эллипсометры в далекой ИК и ближней УФ области спектра с улучшенными параметрами.

Разработанный метод одновременного нахождения четырех параметров системы одноосный кристалл – изотропная и прозрачная пленка является эффективным не только для контроля оптических констант одноосных кристаллов, но и для отработки технологии нанесения тонких диэлектрических пленок. Метод одновременного нахождения четырех параметров системы изотропная подложка – одноосная пленка является полезным для определения показателей преломления обыкновенной и необыкновенной волн в тонких одноосных пленках (любого происхождения) на изотропных подложках.

Определение собственных поляризаций изотропных и анизотропных оптических систем без предварительного знания элементов матрицы Джонса позволяет провести оптическую юстировку эллипсометров с поляризаторами, имеющими любую степень эллиптичности, и компенсаторами, обладающими оптической активностью. Метод юстировки нашел практическое внедрение при разработке серийно выпущенных эллипсометров ЛЭФ-3М1 и в создании новых эллипсометров ЛЭФ-6, ЛЭФ-7А, что отражено в конструкторских документах этих приборов. В вакуумных установках, где вмонтирован эллипсометр, разработанный нами метод юстировки является единственно возможным. Этот метод с 1986 г., со времени опубликования в открытой печати, успешно применяется во многих научных центрах.

Разработанные и запатентованные нами фазосдвигающие устройства успешно используются в современных статических фотометрических эллипсометрах.

Предложенный метод прецизионного определения показателей преломления обыкновенной и необыкновенной волн одноосных кристаллов является эффективным средством для оценки химического и фазового состава кристаллических сред.

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. Поворот плоскости поляризации, вызванный наличием оптически активной среды, которая расположена между линейным поляризатором и отражающей гладкой поверхностью диэлектрика, после отражения усиливается от нескольких единиц до десятков раз в зависимости от угла падения светового пучка на образец (диэлектрик).

2. Проблема одновременного определения показателя преломления и толщины наноразмерных слоев решается при использовании в качестве подложки кристаллического кварца, вырезанного параллельно его оптической оси, когда проявляется максимальная оптическая анизотропия. Решение осуществимо с помощью предложенного алгоритма определения показателей преломления (для обыкновенной и необыкновенной волн) одноосного кристалла с одновременным расчетом толщины и показателя преломления изотропной пленки на его поверхности. При этом эффективная толщина пленки рассчитывается с точностью до единиц нм.

3. Теоретическая предельная точность эллипсометрических измерений в определении показателей преломления для обыкновенной и необыкновенной волн достижима для подложек из одноосных кристаллов при условии устранения несовершенств оптических элементов эллипсометра.

4. Осуществимо нахождение инвариантных точек комплексной дробно-линейной функции с комплексными коэффициентами без предварительного знания ее коэффициентов. Сказанное утверждение следует из сформулированной теоремы и ее доказательства, суть которой заключается в том, что из последовательного умножения ортогональных значений прямой и обратной функций определяются инвариантные точки дробно – линейной функции.

5. При прохождении линейно поляризованного света через непросветленную анизотропную плоскопараллельную пластинку вследствие многократного отражения внутри пластинки возникает неполяризованная компонента. Интенсивность неполяризованной компоненты зависит от значения сдвига фаз δ , который приобретает световой пучок при прохождении через анизотропную пластинку и от величины азимута вектора электрического поля γ относительно ее оптической оси. Она максимальна при $\delta=\pi/2, 3\pi/2$, и $\gamma=(2m+1)\pi/4$.

6. При сочетании поляриметрии и эллипсометрии реализуемы измерения показателей преломления обыкновенной (n_o) и необыкновенной (n_e) волн в одноосных кристаллах с

точностью до 10^{-5} и чувствительностью до 10^{-7} . При этом одновременно определяется толщина фазосдвигающей пластинки с точностью до единиц нм.

7. По мере уменьшения толщины пленки (в диапазоне $< 20-40$ нм), нанесенной на поверхность подложки, уменьшается ее эффективный показатель преломления. Истинная причина такой зависимости (уменьшение показателя преломления от толщины) скрыта рельефом и дефектами атомного строения реальных поверхностей и границ раздела, что обычно интерпретируется влиянием «подготовки» подложки.

8. Отжиг слоев SiO_2 , имплантированных ионами Si, приводит к формированию светоизлучающих нанокристаллов Si в их объеме и к изменению оптических констант слоев на каждом шаге отжига во всем изученном интервале температур. Рассчитанные в приближении Бруггемана изменения показателей преломления и затухания избыточной фазы Si соответствуют отдельным стадиям формирования нановыделений.

Достоверность представленных в диссертационной работе выводов подтверждается количественным и качественным соответствием экспериментальных и теоретических исследований, проведенных автором. Она также подтверждается результатами численных экспериментов на основе предложенных автором алгоритмов и полным соответствием модельных экспериментов с научными данными.

Публикации и доклады. Результаты диссертационной работы в полном объеме изложены в 43 научных публикациях, из них 33 опубликованы в ведущих рецензируемых отечественных и зарубежных журналах [2-34], а также в материалах российских и международных конференций, в авторских свидетельствах на изобретения, в патентах РФ [35-40] и препринтах [41-43]. Список этих публикаций приведен в конце автореферата. Общее число опубликованных научных трудов автора по теме диссертации 64.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на различных международных и российских научных конференциях, симпозиумах и семинарах, в числе которых значатся:

II, III и IV Всесоюзные конференции по эллипсометрии: «Эллипсометрия – метод исследования физико-химических процессов на поверхности твердых тел» (Новосибирск, 1981), «Эллипсометрия: теория методы приложения» (Новосибирск, 1985, 1989); Научный семинар по проблемам эллипсометрии в Институте аналитического приборостроения НТО АН СССР (Ленинград, 1987); II и IV Всесоюзные семинары по оптике анизотропных сред (Москва, 1987, 1990); First International Conference on Spectroscopic Ellipsometry (Paris, France, 11-14 January 1993); II Сибирский конгресс по прикладной математике (ИНПРИМ-96); International Conference on Electronic Materials IUMRS-ICEM 2002 (June 10-14, 2002 Xian, China); Первая республиканская конференция по физической электронике (Ташкент, 1-3

ноября 1995г.); International Conference on Electrodynamics of Complex Media, BIANISOTROPICS'06, (Samarkand, Uzbekistan, September 25-27, 2006, invited communication); 4th International Conference on Spectroscopic Ellipsometry (June 11-15, 2007, Stockholm, Sweden); Международные конференции по фундаментальным проблемам материаловедения (Барнаул, 2007, приглашенный доклад, Барнаул, 2008); Международная конференция «Поляризационная оптика», (Москва 2008, приглашенный доклад); конкурсы научных работ и семинары ИФП СО РАН.

Личный вклад автора. Теоретическая и экспериментальная часть работы, результаты которой составляют основу положений, выносимых на защиту, алгоритмы расчета оптических характеристик изотропных и анизотропных оптических систем, иллюстрирующие возможности развитых модельных представлений, выполнены автором самостоятельно и опубликованы в 23 работах без соавторов или при его ключевом участии.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, выводов и списка литературы. Она изложена на 230 страницах, включая 37 рисунков, 18 таблиц и список литературы из 195 наименований.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, перспективы использования результатов.

Основное содержание работы

Содержание диссертации состоит из четырех основных частей, комплексно освещающих слабоизученные проблемы эллипсометрии и поляриметрии.

Первая часть включает начальные две главы, в которых прослежены этапы развития эллипсометрии и поляриметрии, процесс формирования понятий, а также основные математические представления, которые используются в этих областях оптики.

Ко второй части относится третья глава диссертации, которая полностью посвящена анализу реальной оптической схемы эллипсометра.

Третью часть составляет четвертая глава диссертационной работы, в которой проведены исследования, связанные с прохождением светового пучка через плоскопараллельную пластинку (поляриметрия), изготовленную из анизотропного (одноосного) кристалла.

К четвертой части относятся пятая и шестая главы диссертации, которые посвящены изучению конкретных объектов эллипсометрии с учетом достигнутых результатов в предыдущих частях нашего исследования.

Каждая часть диссертации относится к самостоятельным разделам поляризационной оптики. Обзор теоретической литературы и обсуждения темы для каждой главы самостоятельны.

Первая глава посвящена краткой истории развития поляризационной оптики и формирования таких понятий, как: эллипсометрия, поляриметрия, кристаллооптика и металлооптика. Здесь же обсуждаются процессы формирования основных понятий, терминов и развитие математического аппарата в указанных разделах оптики, рассматриваются широко используемые понятия в оптике, такие как: показатели преломления и затухания и их связи с показателем поглощения. В этой же главе обсуждаются различные схемы эллипсометра, формулы и математический аппарат, используемые в эллипсометрических измерениях.

Во **второй главе** рассматриваются способы описания и экспериментальных измерений СЭП светового пучка и взаимодействия поляризованного света с линейными оптическими системами, а также изложена суть метода и основные соотношения, которые используются в других параграфах и главах диссертации при решении той или иной практической задачи. В этой главе обсуждаются особенности параметрического представления измерительных зон эллипсометра и их использование. Здесь же предложен алгоритм, позволяющий определить поляризационные углы без введения измерительных зон эллипсометра непосредственно из любого набора показаний лимбов поляризатора, анализатора и компенсатора. Показательно, что можно не вдаваться в подробности выяснения направления поворота поляризующих элементов, увеличения или уменьшения показателей их лимбов и, тем не менее, однозначно определять поляризационные углы исследуемого объекта.

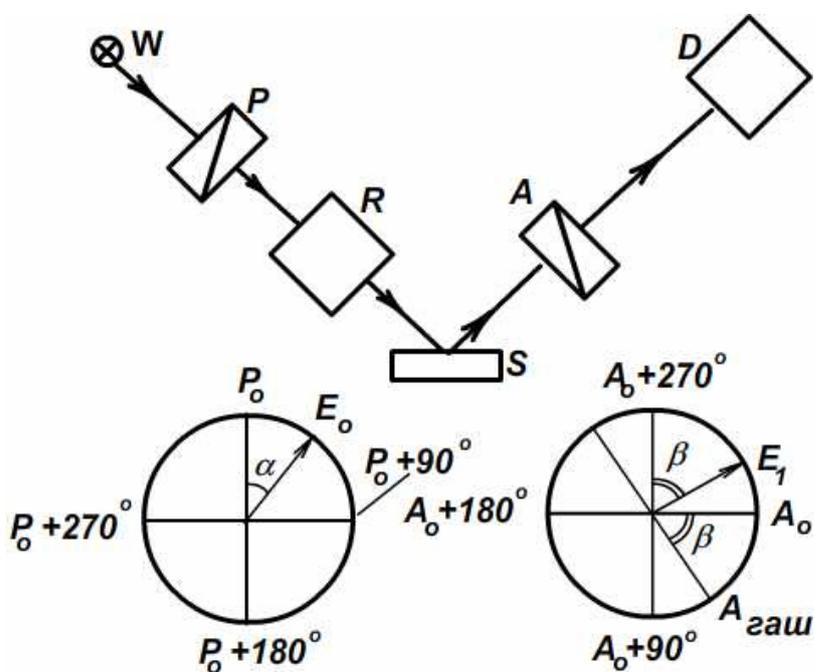


Рис.1. Простейшая схема эллипсометра для измерения предельно малого вращения плоскости поляризации. W и D источник и приёмник излучения; P и A линейные поляризатор и анализатор; R – исследуемый объект на пропускание; S – вспомогательный элемент.

На основе детального анализа полученных результатов обосновывается принцип созданного подхода СПЭ. Его суть состоит в следующем. В схеме эллипсометра компенсатор (К) (на рис.1 обозначен буквой R) представляет собой плоскопараллельную пластинку из анизотропного материала (например, одноосного кристалла или оптически активной среды R). Она является объектом исследования, а отражающая система (S) со специально выбранными параметрами – вспомогательным элементом. В данном случае отсчёт азимутальных углов гашения поляризующих элементов (поляризатора P и анализатора A) эллипсометра ведётся относительно направлений собственных поляризаций кристалла (в частности, от главной плоскости одноосного кристалла).

Метод СПЭ даёт возможность проводить однозначные и точные измерения разности фаз, дихроизма или других характеристик двулучепреломляющих плоскопараллельных пластинок. Здесь же представлены полученные общие выражения для инвариантов эллипсометрии относительно параметров компенсатора T_c и δ_c и отражающей системы T_s ($T_s = \text{tg}\Psi$) и Δ .

Параметр T_c характеризует отношение амплитудных (по модулю) коэффициентов пропускания фазосдвигающей пластинки (компенсатора) вдоль его "медленной" и "быстрой" осей; δ_c обозначает приобретаемый падающей световой волной на выходе пластинки сдвиг фазы между компонентами вектора электрического поля, параллельного "медленной" и "быстрой" осям. Ψ и Δ называются поляризационными углами или эллипсометрическими параметрами отражающей системы – образца.

Формулы записаны в P, S системе координат. При переходе к системе координат «быстрой-медленной» оси компенсатора формулы, полученные для образца, переходят в формулы, полученные для компенсатора, и наоборот. Следовательно, вместо системы компенсатор–образец в схему эллипсометра может быть включена система образец–образец, где первый образец является компенсатором, а второй – исследуемым образцом. Если на оба образца свет падает под одним и тем же углом, но в плоскостях падения, отличающихся на угол C, то в такой системе всегда выполняется условие компенсации. Это даёт возможность по инвариантам эллипсометрии из двух неэквивалентных положений гашения поляризатора и анализатора определить ψ и Δ обоих образцов. При необходимости один из образцов может быть взят как эталонный с известными параметрами. Таким образом, для любой области спектра можно решить вопрос о выборе компенсатора. Это особенно важно при проведении эллипсометрических измерений в УФ и далёкой ИК области спектра, где изготовление четвертьволновых пластинок связано с техническими трудностями.

Кроме этого, в данной главе представлены соотношения для одновременного определения двулучепреломления и меры дихроизма из одного набора оптических элементов

эллипсометра. В работе получены достаточно простые соотношения для определения разности фаз, вносимой двулучепреломляющей пластинкой (компенсатором) и отражающей системой при прохождении и отражении светового пучка соответственно.

В третьей главе рассматривается реальная схема эллипсометра. При исследовании анизотропных систем особое значение приобретает учёт погрешностей азимутальных углов поворота поляризатора, компенсатора, анализатора и несовершенств этих оптических элементов. В данном случае принципиально важно выяснить основные причины неглубокого минимума на выходе эллипсометра в условии гашения. Одним из способов обнаружения наличия анизотропии в эллипсометрии отражения является метод многоугловых измерений. Поэтому, кроме устранения погрешностей в измерении азимутальных углов в условиях гашения, необходим также способ контроля этих погрешностей при изменении угла падения.

С целью экспериментальной реализации эллипсометрии анизотропных сред главный упор делается в работе на устранение погрешностей и несовершенств поляризующих оптических элементов. Путем совмещения оси вращения и нормали к поверхности оптических элементов, с помощью специальных диафрагм, подбором поляризаторов и тщательной предварительной механической юстировкой практически полностью устранены возникающие нежелательный фон и блики при работе с прибором. В этой главе обсуждаются свойства каждого оптического элемента и допустимые значения их несовершенств. Предложен метод точной оптической юстировки эллипсометра, позволяющий находить начальные значения углов поворота поляризатора P_0 , анализатора A_0 и компенсатора C_0 при фиксированном угле падения света на образец. Все известные ранее способы определения этих углов предполагают либо предварительное выставление плеч поляризатора и анализатора по одной оси, либо проведение измерений при нескольких углах падения света на «юстировочный» образец.

Преимуществом разработанного метода является возможность определения P_0 , A_0 , C_0 , не убирая из эллипсометра компенсатор, т.е. обеспечить их проверку в рабочем состоянии прибора. Кроме этого, метод отличается простотой, позволяет быстро находить эти величины, не прибегая к графическим построениям и не требуя предварительного знания величин поляризационных углов ψ и Δ образца или параметров компенсатора T_c и δ_c . Суть метода заключается в циклическом повороте поляризатора, анализатора и компенсатора на 90° с определённой последовательностью, что даёт возможность находить P_0 , A_0 , C_0 . Метод применим с компенсатором и без него в схеме эллипсометра. В последнем случае при наличии оптической активности устраняется её влияние на результаты эллипсометрических измерений.

В этой же главе представлен способ измерения малых поворотов плоскости поляризации, которые имеются в слабых оптически активных средах. Суть способа состоит в использовании того факта, что при отражении от границы раздела двух прозрачных сред линейно поляризованный пучок остаётся линейно поляризованным. При этом отношение амплитудных коэффициентов отражения r_s/r_p двух пучков, поляризованных перпендикулярно плоскости падения и в плоскости падения при углах падения, близких к углу Брюстера, достигает значений нескольких десятков. Показано, что азимут электрического вектора в падающем α и отражённом β пучках связаны соотношением $\beta = k \cdot \alpha$ (см. рис. 1). Поскольку всегда $k = r_s/r_p > 1$, то эту величину можно назвать коэффициентом усиления. При изменении угла падения рабочего светового пучка на границу раздела двух прозрачных сред, величина k изменяется в довольно широких пределах – от нескольких единиц до нескольких десятков. Величина k принимает максимальные значения вблизи угла Брюстера, когда r_s много больше r_p за счёт того, что $r_p \rightarrow 0$. Поэтому из измеренного значения угла β определяется предельно малое значение угла α . Коэффициент усиления k всегда можно измерить или рассчитать. На основе экспериментального измерения малых вращений плоскости поляризации в магнитооптическом стекле на эллипсометре с минутными лимбами и на поляриметре с 5-секундными угломерными устройствами показано, что данный способ, в частности, позволяет использовать минутные лимбы отсчёта углов поворота как 5-секундные угломерные устройства.

Этот способ можно рассматривать как частный пример использования метода СПЭ, где в данном случае отражающая система «усиливает» поворот плоскости поляризации и «подавляет» избыточные шумы источника света.

В этой же главе приводится сформулированная теорема, которая обобщает все частные случаи определения собственных поляризаций изотропных и анизотропных оптических систем. Она выглядит следующим образом.

Теорема: Пусть в множествах Z и Ω комплексных чисел выделены последовательности элементов, удовлетворяющих условию:

$$\omega_n = \frac{az_n + b}{cz_n + d} \equiv [\alpha]z_n, \text{ где } \alpha = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$\omega_{2n-1}\omega_{2n} = -1, \quad z_{2n}z_{2n+1} = -1. \quad (2)$$

Если собственные числа λ_1, λ_2 матрицы α ненулевые и имеют разные модули $|\lambda_1| \neq |\lambda_2|$, верны следующие утверждения относительно сходимости последовательностей из Z, Ω, Z^{-1} и Ω^{-1} :

$$\lim_{n \rightarrow \infty} [\alpha']\omega_{2n+1} = \lim_{n \rightarrow \infty} z_{2n+1}, \quad \lim_{n \rightarrow \infty} [\alpha](-z_{2n}^{-1}) = -\lim_{n \rightarrow \infty} \omega_{2n}^{-1} \quad (3)$$

(в частном случае равные между собой пределы стремятся к 0 или к бесконечности).

В диссертации даны доказательства этой теоремы и некоторые ее приложения.

В качестве иллюстрации рассмотрим простейший случай применения теоремы в доказательстве правомерности процесса юстировки (или калибровки) эллипсометра в отсутствие компенсатора и нулевых недиагональных элементов матрицы отражения ПОС при отражении от поверхности диэлектрика.

В минимуме интенсивности излучения на выходе эллипсометра z и ω характеризуют СЭП на выходе поляризатора и анализатора, соответственно. Поэтому в рассматриваемом случае $z = \operatorname{tg} \alpha$, $\omega = 1/\operatorname{tg} \beta$ и $\rho = a/d = \operatorname{tg} \psi \exp(i\Delta)$ (обозначения углов приведены на рис.1). Последовательности $2n$ циклических поворотов поляризатора и анализатора на $\pm 90^\circ$ соответствуют выражения:

$$\begin{aligned} \omega_{2n+1} = \operatorname{tg} \alpha_{2n} = \rho^{2n} \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha_1}, \quad z_{2n+1} = (\operatorname{tg} \beta_{2n+1})^{-1} = \rho^{2n} \operatorname{tg}(\beta_1)^{-1}, \\ \omega_{2n+2} = \rho^{-2n} \omega_2 = \rho^{-2n} \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha_2}, \quad z_{2n+2} = \rho^{-2n} z_2 = \rho^{-2n} \operatorname{tg}(\beta_2)^{-1}, \end{aligned} \quad (4)$$

Так как для любого диэлектрика практически всегда $|\rho| < 1$, при $n \rightarrow \infty$ имеем

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \alpha_{2n+1} = \lim_{n \rightarrow \infty} \beta_{2n} = k\pi, \\ \lim_{n \rightarrow \infty} \alpha_{2n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \beta_{2n+1} = (2k+1)\pi/2, \end{aligned} \quad (5)$$

где $k=0,1$. Из (4) следует, что повороты поляризатора и анализатора с последовательностью, которая удовлетворяет условиям ортогональности СЭП (условие (2)) на их выходе, приводят к определению собственных поляризаций изотропной отражающей системы на лимбах поляризатора и анализатора. Соотношения (5) являются частным случаем утверждения теоремы (3).

В других возможных приложениях данной теоремы параметры a, b, c, d могут приобретать иной смысл.

В **четвертой главе** проводится исследование оптических свойств одноосных кристаллов с изготовленными плоскопараллельными пластинками на основе СПЭ. Теория прохождения света через плоскопараллельную пластинку имеет большое значение в физической оптике, и этому вопросу посвящено огромное количество работ. Световой пучок, проходящий через плоскопараллельную пластинку из любого вещества, может изменять свою интенсивность и состояние поляризации. На этом явлении основаны различные поляризационно-оптические приспособления для изменения характеристики светового пучка в требуемом направлении. Результаты, полученные в этой главе, могут служить существенным дополнением в освещении вопроса о прохождении света через

плоскопараллельную анизотропную пластинку и быть полезными в решении многих практических задач эллипсометрии, поляриметрии и кристаллооптики.

Известно, что существенные трудности реализации однозонной методики эллипсометрических измерений связаны прежде всего с необходимостью точного определения параметров T_c и δ_c компенсатора. Но как показывают наши исследования, их определение имеет смысл только при строго заданной температуре.

Измерение параметров компенсатора из исландского шпата и кристаллического кварца проводилось в интервале температур от $+15^\circ\text{C}$ до $+35^\circ\text{C}$. Особенно высокая температурная чувствительность компенсатора из исландского шпата позволяет изготовить ахроматические компенсаторы в широком интервале длин волн. Экспериментальной реализации такого компенсатора посвящён второй раздел этой главы. Показано, что температурная чувствительность δ_c компенсатора в интервале температур от $+19^\circ\text{C}$ до $+40^\circ\text{C}$ позволяет реализовать ахроматическую компенсацию для оптимальной толщины пластинки из исландского шпата в пределах от 2400 до 2430 мкм. При этом необязателен строгий контроль толщины фазовой пластинки, как это обычно необходимо.

Далее приводятся результаты экспериментального исследования методом эллипсометрии эффектов многократного отражения на работу четвертьволновых фазосдвигающих пластинок из кристаллического кварца при прохождении через них поляризованного светового излучения до и после просветления их рабочих поверхностей. Параметры T_c и δ_c пластинок до и после просветления определялись по четырёхзонной методике эллипсометрических измерений. Результаты измерений T_c и δ_c , проведённых на нескольких фазосдвигающих четвертьволновых пластинках для двух пар измерительных зон, показали, что после просветления величины (T_c-1) и разность δ_c в двух парах измерительных зон практически становятся равными нулю. Выполняются все зонные соотношения, что дало основание утверждать о влиянии интерференционных явлений на работу фазосдвигающих пластинок. Величина минимально регистрируемого сигнала после просветления уменьшилась практически более чем на два порядка.

В этой главе дано изложение методики и экспериментальной реализации измерения неполяризованной компоненты, возникающей при прохождении линейно поляризованного света через плоскопараллельную анизотропную пластинку.

Показано, что в условии минимума интенсивности света на выходе эллипсометра возникающая эллиптическая поляризация светового пучка может быть скомпенсирована с помощью отражающей системы, а величина неполяризованной компоненты регистрируется с помощью фотоприёмника на выходе анализатора. В работе приводятся экспериментальные

результаты измерений неполяризованной компоненты, возникающей при прохождении линейно поляризованного света через кварцевую фазосдвигающую пластинку (см. рис.2).

Заметим, что до начала настоящей диссертационной работы считалось невозможным измерение неполяризованной компоненты для эллиптически поляризованного светового пучка.

Теоретически доказано и экспериментально реализовано на основе СПЭ измерение значений показателей преломления обыкновенной и необыкновенной волн объемной фазы одноосного кристалла с точностью до 10^{-5} и чувствительностью 10^{-7} и толщины плоскопараллельной пластинки с точностью до единиц нм. Демонстрация возможности предложенного подхода в определении оптических констант представлена на фрагментах номограмм в плоскости T_c, δ_c (см. рис.3). В работе показано, что выбор соответствующей толщины плоскопараллельной анизотропной пластинки позволяет определять показатели преломления с точностью до 10^{-7} . На основе измеренных значений показателей преломления обыкновенной и необыкновенной волн искусственного одноосного кристаллического кварца определена их температурная зависимость (см. табл.). Из результатов измерений толщины пластинки в зависимости от температуры определен коэффициент температурного расширения.

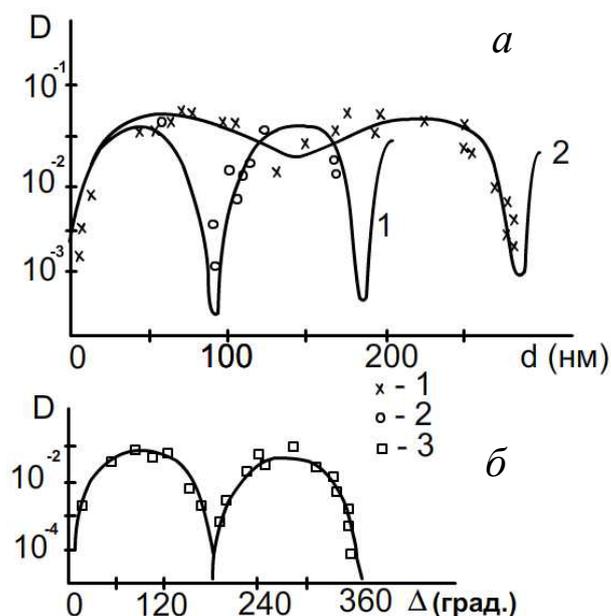


Рис.2 Расчетные значения D (в отн. ед.) а – зависимость от толщины d диэлектрической пленки и результаты эксперимента на системах: 1 – Si-SiO₂, 2 – Si-Si₃N₄, б – зависимость D от Δ , 3 – эксперимент.

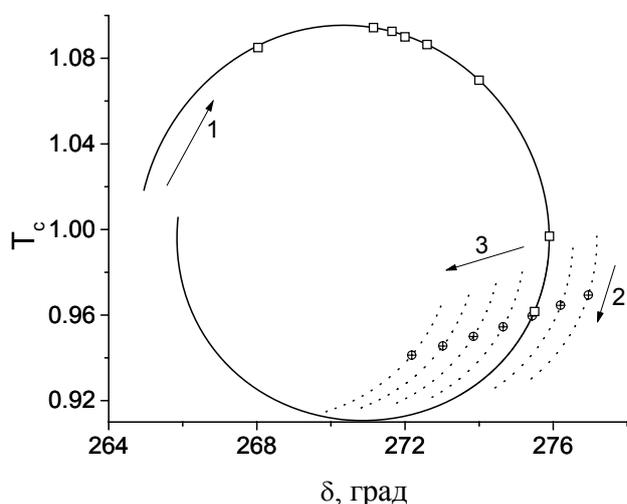


Рис.3. Фрагменты номограмм для определения показателей преломления и толщины фазосдвигающей пластинки по СПЭ. Сплошная кривая - номограмма в интервале толщин от 472 до 472.2 мкм для температуры 22°C, \square – экспериментальные точки. Пунктирные кривые – номограмма в интервале толщин от 472.11 до 472.13 мкм для температур от 18°C до 30°C с шагом 2°C, \oplus – экспериментальные точки. Стрелки 1,2 показывают направление роста толщины, 3 – температуры.

Действительно, температурные коэффициенты dn_o/dT и dn_e/dT показателей преломления, соответствующие обыкновенной и необыкновенной волнам, равняются значениям $(7.0 \pm 0.1) \times 10^{-6} K^{-1}$ и $(8.3 \pm 0.1) \times 10^{-6} K^{-1}$ для искусственного кристаллического кварца, а для природного кристаллического кварца составляют $(5.4 \pm 0.1) \times 10^{-6} K^{-1}$ и $(6.5 \pm 0.1) \times 10^{-6} K^{-1}$. Эти результаты хорошо согласуются с известными научными данными.

Таблица. Результаты определения n_o и n_e в зависимости от температуры фазосдвигающей пластинки из искусственного кристаллического кварца

| t°С | 18 | 20 | 22 | 24 | 26 | 28 | 30 |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| n_o | 1.542668 | 1.542654 | 1.542641 | 1.542626 | 1.542612 | 1.542598 | 1.542584 |
| n_e | 1.551723 | 1.551706 | 1.551691 | 1.551674 | 1.551657 | 1.551641 | 1.551624 |

Пятая глава работы посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию изотропных и анизотропных систем методом эллипсометрии на отражение. В экспериментальных исследованиях используются условия, при которых проявляется максимальное влияние анизотропии на результаты эллипсометрических измерений. При исследовании изотропных пленок на анизотропной поверхности это влияние максимально проявляется у кристаллов, вырезанных параллельно оптической оси.

В этой главе приводится алгоритм определения четырёх параметров системы диэлектрическая плёнка – одноосный кристалл. Алгоритм основан на равенстве нулю недиагональных элементов коэффициентов отражения матрицы Джонса, когда оптическая ось кристалла лежит в плоскости падения или перпендикулярна ей. Это условие максимальной чувствительности к параметрам анизотропной системы достигается экспериментально при соответствующих положениях поляризатора, компенсатора, анализатора и образца. Разработанный алгоритм позволяет определить 4 параметра (n_o , k_o , n_e , k_e при известных n_1 и d_1) у поглощающих кристаллов, а у прозрачных кристаллов возможно одновременное определение всех параметров (n_o , n_e , n_1 , d_1).

На примере системы кристаллического кварца с прозрачной поверхностной плёнкой двуокиси кремния проводится анализ точности нахождения четырёх параметров. Показано, что минимальная ошибка в определении параметров n_o , n_e наблюдается для малых толщин плёнок и растёт с ростом толщины, достигая максимального значения для d_1 , близкого к эллипсометрическому полупериоду $d_0/2$. В то же время ошибка в определении показателя преломления плёнки n_1 и толщины d_1 уменьшается с ростом абсолютной толщины плёнки и достигает минимального значения d_1 , близкого к $d_0/2$.

Здесь же описывается методика эксперимента. В четвёртом разделе этой главы приводятся экспериментальные результаты, которые были получены при определении

показателей преломления для ряда одноосных кристаллов и параметров поверхностной плёнки на них. Эти результаты иллюстрируют эффективность предложенного нами алгоритма определения четырёх параметров. Кристаллический кварц и сапфир выбраны в качестве эталона как хорошо известные материалы для отработки метода, ниобат лития и парателлурид – как широко используемые материалы в интегральной оптике и акустооптике.

Далее рассматривается метод одновременного определения четырёх параметров на примере системы кристаллический кварц – аморфная плёнка двуокиси кремния. Аморфная плёнка SiO_2 наносилась на тщательно обработанную поверхность кристаллического кварца. В работе представлены в виде номограммы теоретические расчёты и экспериментальные результаты зависимости эллипсометрических углов ψ_j , Δ_j ($j = 1$, оптическая ось кристалла лежит в плоскости падения и $j = 2$ – перпендикулярно ей) от толщины плёнки и её показателя преломления. Здесь же представлены экспериментальные результаты измерения углов ψ_j и Δ_j на образцах в процессе послойного снятия плёнки SiO_2 для различных температур синтеза. Большие изменения эллипсометрических параметров для интервала измерений d от 0 до d_0 с показателем преломления от 1,44 до 1,48 позволяют с высокой точностью непосредственно из номограмм определять параметры плёнок в интервале толщин от 20 до 240 нм. Показано, что для толщин плёнок ~ 140 нм углы Δ_j близки к нулю, а ψ_j – максимально чувствительны к изменению показателя преломления плёнки, который можно определить с точностью $\sim 10^{-4}$ только по значениям ψ_j непосредственно из номограммы.

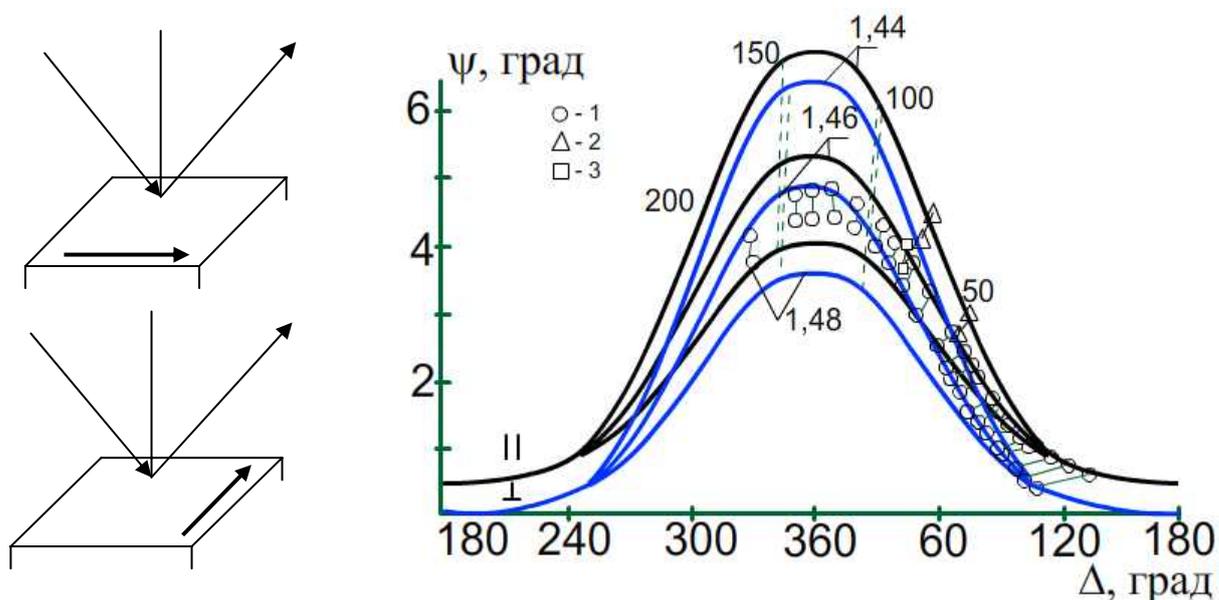


Рис.4. Номограмма зависимости эллипсометрических углов Ψ_j и Δ_j от толщины пленки SiO_2 на подложке из кристаллического кварца, когда оптическая ось кристалла относительно плоскости падения параллельна и перпендикулярна (схемы см. слева).

Цифры около сплошных кривых – значения показателя преломления пленки, штрихи – линии равной толщины, цифры около штриховых кривых – толщина пленки в нанометрах, 1-3 – результаты эксперимента.

При малых значениях толщин плёнок для каждой ориентации кристалла кривые, соответствующие различным показателям преломления, практически вырождаются в одну (аналогично при увеличении толщины плёнки, достигающей значений эллипсометрического периода d_0 , см. рис. 4) и параметры ψ_j становятся нечувствительными к изменению показателей преломления. Следовательно, для одной ориентации оптической оси кристалла относительно плоскости падения, как и для случая изотропной подложки, задача одновременного определения n_1 и d_1 плёнок становится проблематичной для толщин меньше 20 нм.

Однако, используя измерение эллипсометрических углов при двух ориентациях кристалла, по предложенным алгоритмам можно определять параметры плёнки и для толщин вплоть до единиц нанометров, где это графически невозможно.

В диссертации в виде графика приводятся результаты определения четырёх параметров системы по этим алгоритмам из полученных экспериментальных и модельных значений ψ_j , Δ_j для широкого интервала толщин плёнок SiO_2 . В процессе исследования обнаружена зависимость показателя преломления от толщины пленок SiO_2 . Для всех пленок с показателем преломления от 1,44 до 1,48 при значениях толщины менее 20 нм наблюдается уменьшение показателя преломления.

Здесь же излагаются результаты, которые были получены при целенаправленном исследовании данной системы для выявления истинных причин, приводящих к зависимости показателя преломления от толщины пленки. Для этой цели пленки SiO_2 , нанесенные методом пиролиза тетраэтоксисилана на плоскопараллельные подложки из ориентированного кристаллического кварца и пластины кремния, подвергались послойному травлению в растворе Плискина. Рассчитывались показатель преломления и геометрическая толщина пленок из измеренных эллипсометрических углов после каждого травления.

На основе проведенного эксперимента при разных подложках из кристаллического кварца показано, что для пленок тоньше 20 нм наблюдаемую зависимость эффективного показателя преломления от толщины можно интерпретировать влиянием границы пленка–подложка. Для хорошо обработанной поверхности кристаллического кварца полностью воспроизводились предыдущие результаты уменьшения показателя преломления по мере уменьшения толщины пленок. Уменьшение показателя преломления пленки, нанесенной на хорошо обработанную поверхность подложки, можно интерпретировать пористой структурой переходного слоя. Пористая структура может возникать в результате неполного заполнения первоначальных неровностей на поверхности подложки. Однако и при повторном нанесении на «ровную» или «заполненную» поверхность кристаллического кварца также наблюдается уменьшение показателя преломления для пленок тоньше 20 нм. Факт

уменьшения показателя преломления для пленок тоньше 20 нм после повторного нанесения пленки на «ровную» или «заполненную» поверхность кристаллического кварца наводит на мысль о закономерности этого явления. Его причины, возможно, кроются в проявлении поверхностных сил на границе раздела двух сред.

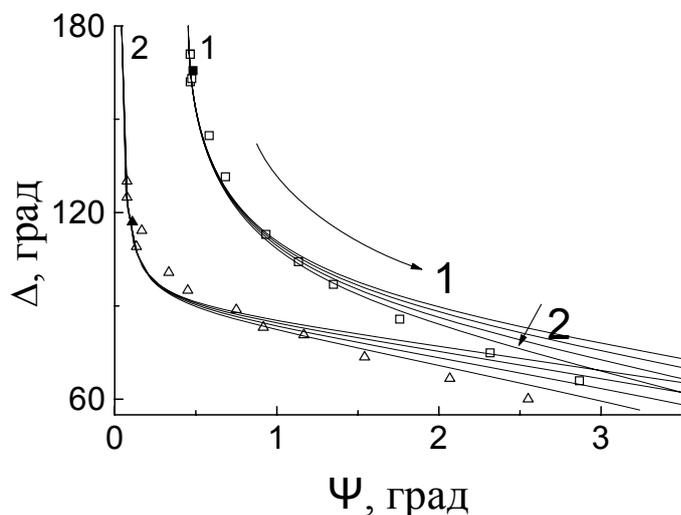


Рис.5. Фрагмент номограммы расчетных и экспериментальных значений Ψ и Δ : сплошные кривые – расчет для разных оптических констант, \square и \triangle – эксперимент, 1 и 2 – оптическая ось параллельна и перпендикулярна плоскости падения соответственно. Стрелки 1 и 2 показывают направления роста толщины и показателя преломления пленки. Расчетные значения получены для толщин от 0 до 10 нм и показателей преломления от 1.42 до 1.45. и 1 – измерения до нанесения пленки.

Наблюдаемое увеличение показателя преломления пленок, нанесенных на полированные поверхности подложек из кристаллического кварца, интерпретировано влиянием остатков абразивного материала в переходном слое. Необходимо отметить, что поверхность подложки после удаления пленки сгладилась. Это иллюстрирует фрагмент номограммы расчетных и экспериментальных значений Ψ и Δ , представленный на рис. 5. Видно, что экспериментальные значения Ψ и Δ после удаления пленки приближаются к расчетным значениям, соответствующим «геометрически гладкой» поверхности подложки. Это также следует из моделирования поверхности до повторного нанесения пленки (темный квадрат и треугольник) и после удаления уже новой пленки. Моделирование проводилось в рамках однослойной модели с эффективными параметрами пленки, равными 10 Å по толщине, 1.354 по показателю преломления до нанесения пленки. После нанесения пленки и ее удаления результаты моделирования показали, что толщина равна 7.5 Å, а показатель преломления пленки – 1.332.

Для системы Si-SiO₂ обнаруженное увеличение показателя преломления при уменьшении толщины объясняется закруглением первоначальной поверхности подложки в результате окисления поверхности кремния.

Таким образом, истинная причина уменьшения показателя преломления для толщины меньше 20 нм скрыта рельефом и дефектами атомного строения реальных поверхностей и границ раздела, что обычно интерпретируется влиянием «подготовки» подложки.

Обнаружено явление сглаживания поверхности кристаллического кварца после нанесения и последующего удаления аморфной пленки SiO_2 .

В этой же главе проведено сопоставление значений показателей преломления n_e и n_o подложки $n_e(0)$ и $n_o(0)$ на поверхности диффузионного волноводного слоя, определённых эллипсометрическим и волноводным методами. Показано, что эллипсометрический метод позволяет находить показатели преломления на поверхности диффузионных волноводных слоёв на подложке типа LiNbO_3 . Комплексное применение эллипсометрического и волноводного методов для определения параметров с малым числом мод делает возможным восстановление профилей показателей преломления без использования трудоёмких спектральных методов.

Шестая глава диссертации посвящена трем конкретным приложениям эллипсометрии. Сначала исследована оптическая анизотропия пленок Ленгмюра – Блоджетт (ЛБ) пентакоза - 10, 12-диинной кислоты (ПДА-11-8) после полимеризации методами эллипсометрии на отражение и пропускание. Пленка ЛБ ПДА-11-8 моделирована как одноосная кристаллическая. В рамках такой модели доказано, что направление вытягивания пленки ЛБ лежит в главной плоскости. Показано, что анизотропия пленки проявляется преимущественно наличием дихроизма. Для толщин в интервале 10 – 200 нм получены следующие оптические константы: $n_o=1.61 \pm 0.01$, $k_o=0.14 \pm 0.015$, $n_e=1.62 \pm 0.015$, $k_e=0.165 \pm 0.01$.

Далее представлены результаты исследования отжига слоев SiO_2 с избыточным Si, приводящего к формированию кремниевых нанокристаллов, способных люминесцировать в видимой области благодаря квантово-размерным ограничениям. Из результатов исследования

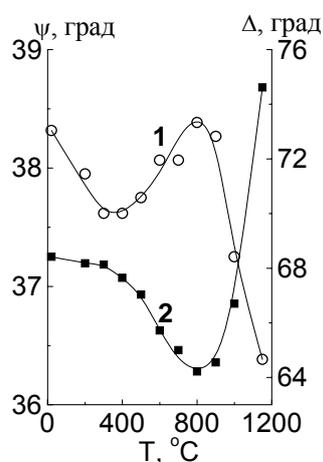


Рис.6. Изменения величины $\psi(1)$ и $\Delta(2)$ исследуемого слоя при изохронном отжиге.

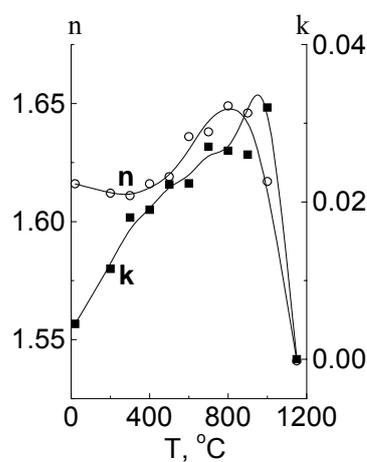


Рис.7. Изменения показателей преломления n и поглощения k исследуемого слоя при изохронном отжиге.

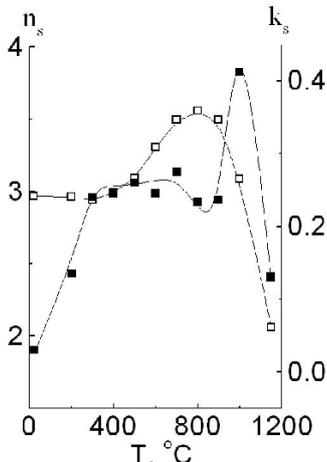


Рис.8. Зависимость показателя преломления и поглощения фазы кремния от температуры отжига.

отжига слоев SiO_2 при формировании в них светоизлучающих нанокристаллов Si установлено, что эллипсометрия четко реагирует на изменения оптических констант слоев на каждом шаге отжига во всем изученном интервале температур (рис. 6-8). В приближении Бруггемана вычислены изменения оптических параметров избыточной фазы Si и обнаружено, что они соответствуют отдельным стадиям формирования нановыделений.

В заключительном разделе этой главы исследованы пленки TiO_2 , полученные после полного термического окисления пленок металлического Ti на плавленом кварце. Определены оптические и структурные параметры пленок. Результаты работы основаны на их многократных измерениях в течение двухлетнего хранения пленок на воздухе. Тем самым, проверена временная стабильность пленок TiO_2 . Показано, что оптические характеристики пленки поликристаллического рутила обладают высокой стабильностью при длительном контакте с атмосферой. Максимальное расхождение результатов измерений для поляризационного угла ψ составляет 0,1 градуса, для Δ – 0,9 градуса.

Были получены следующие результаты: для первого образца $n=2.544$, $d=516 \text{ \AA}$, второго – $n=2.547$, $d=567 \text{ \AA}$ и третьего образца $n=2.594$, $d=782 \text{ \AA}$. Как показывают эти значения, обнаружена существенная зависимость показателя преломления для пленки оксида титана от ее толщины. По мере уменьшения толщины пленки уменьшается ее показатель преломления. На основе рентгенографических исследований эта зависимость объясняется кристаллической структурой пленки.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Сформулирована и доказана теорема, заключающаяся в том, что инвариантные точки дробно-линейной функции с комплексными коэффициентами определяются без предварительного знания ее коэффициентов из последовательного умножения ортогональных значений прямой и обратной функций. На конкретных примерах показано, что использование выводов этой теоремы может заменить сложные процедуры измерений и вычислений при решении многих задач не только эллипсометрии, но и оптики.
2. Представлена практическая реализация определения собственных поляризаций поляризующих оптических систем в решении задачи поляризационной оптики – юстировке эллипсометров с поляризаторами, имеющими произвольную степень эллиптичности и компенсаторами, обладающими оптической активностью.
3. Разработан и экспериментально реализован способ измерения малых поворотов плоскости поляризации оптически активной среды. Показано, что способ, в частности, позволяет использовать минутные лимбы как 5 - секундные угломерные устройства для отсчета углов поворота поляризатора в поляриметре.

4. Обнаружена неполяризованная компонента, возникающая при прохождении линейно поляризованного света через непросветленную анизотропную плоскопараллельную пластинку, и измерена ее величина. Установлено, что интенсивность неполяризованной компоненты зависит от значения сдвига фаз δ , который приобретает световой пучок при прохождении через непросветленную анизотропную пластинку, и от величины азимута вектора электрического поля γ относительно ее оптической оси. Интенсивность неполяризованной компоненты увеличивается по мере возрастания значений δ в интервале от 0 до $\pi/2$ и от π до $3\pi/2$. В интервале от $\pi/2$ до π и от $3\pi/2$ до 2π – уменьшается. Она также увеличивается по мере приближения γ к значениям $(2m+1)\pi/4$. Для всех значений γ , равных 0 или кратных $\pi/2$, независимо от значений δ , величина неполяризованной компоненты практически равна нулю. Интенсивность неполяризованной компоненты максимальна при $\delta=\pi/2, 3\pi/2$, и $\gamma=(2m+1)\pi/4$ ($m=0,1,2$). Ранее эта неполяризованная компонента воспринималась как неустраняемый фон (или шум в оптическом тракте эллипсометра).
5. Разработаны, изготовлены и экспериментально реализованы высокоточные ($\delta=\pi/2, T=1$) четвертьволновые фазосдвигающие устройства для поляриметрических и эллипсометрических приборов. С их помощью достигнуты условия выполнения всех эллипсометрических зонных соотношений и равенства поляризационных углов в четырех неэквивалентных измерительных зонах эллипсометра для изотропных поляризующих оптических систем, что эквивалентно четырем измерениям. Неравенство этих углов указывает на наличие анизотропии и позволяет ее обнаружить в исследуемой отражающей поляризующей оптической системе.
6. Предложен алгоритм одновременного определения четырех из шести оптических параметров системы одноосный кристалл – прозрачная изотропная пленка ($n_o, k_o, n_e, k_e, n_1, d_1$) и одновременного определения всех параметров в случае прозрачных кристаллов (n_o, n_e, n_1, d). Эффективность алгоритма продемонстрирована на примере экспериментального исследования ряда одноосных кристаллов таких, как: кристаллический кварц, ниобат лития, танталат лития, парателлурид и др.
7. Для системы кристаллический кварц – пленка двуокиси кремния ($\text{SiO}_2 + \text{SiO}_2$) установлено, что из результатов измерений при двух ориентациях одноосного кристалла можно определить одновременно с высокой точностью показатель преломления и толщину прозрачной пленки вплоть до единиц нанометров. При толщине пленки ~ 140 нм можно определить ее показатель преломления с точностью до 10^{-4} . Обнаружено явление сглаживания поверхности кристаллического кварца после нанесения и последующего удаления аморфной пленки SiO_2 . Установлено, что для широко используемых в микро- и нанoeлектронике пленок SiO_2 толщиной меньше 20 нм наблюдается зависимость

эффективного показателя преломления от толщины. По мере уменьшения толщины пленок уменьшается ее показатель преломления. Объяснение истинной причины уменьшения показателя преломления от толщины затруднено влиянием реальной структуры поверхности подложки и качеством её подготовки. Также установлена аналогичная зависимость для пленок TiO_2 , широко используемых в различных областях науки и техники, включая медицину. Причина этой зависимости для пленок TiO_2 интерпретирована изменением кристаллической структуры пленок от толщины.

8. Обоснован и экспериментально реализован метод измерения показателей преломления для одноосных кристаллов с точностью до 10^{-5} и чувствительностью до 10^{-7} и толщины плоскопараллельной пластинки с точностью до единиц нм на основе разработанного подхода сочетания поляриметрии и эллипсометрии. Установлено, что температурные коэффициенты показателей преломления для природного и искусственного кристаллического кварца отличаются. Получены температурные коэффициенты dn_o/dT и dn_e/dT показателей преломления, соответствующие обыкновенной и необыкновенной волнам, которые равняются значениям $(7.0 \pm 0.1) \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ и $(8.3 \pm 0.1) \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ для искусственного кристаллического кварца, а для природного кристаллического кварца составляют $(5.4 \pm 0.1) \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ и $(6.5 \pm 0.1) \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$.
9. Предложен метод одновременного определения линейного дихроизма и двулучепреломления непосредственно из показаний лимбов поляризатора и анализатора при наличии оптической активности в плоскопараллельной пластинке из одноосного кристалла. Метод реализован на примере исследования оптической анизотропии пленок Ленгмюра – Блоджетт (ЛБ) пентакоза -10, 12-дииновой кислоты (ДА-11-8) после полимеризации. Пленка ЛБ ПДА-11-8 моделирована как одноосная кристаллическая и в рамках такой модели доказано, что направление вытягивания пленки лежит в главной плоскости. Показано, что анизотропия пленки проявляется преимущественно наличием дихроизма.
10. Из результатов исследования отжига слоев SiO_2 при формировании в них светоизлучающих нанокристаллов Si установлено, что эллипсометрия четко реагирует на изменения оптических констант слоев на каждом шаге отжига во всем изученном интервале температур. В приближении Бруггемана вычислены изменения показателей преломления и затухания избыточной фазы Si и обнаружено, что они соответствуют отдельным стадиям формирования нановыделений.

Таким образом, результаты выполненной работы существенно расширяют возможности поляриметрии и эллипсометрии. Совокупность сформулированных результатов и основных теоретических положений диссертации вносит значительный вклад в физику

оптических явлений в твердых телах и границ раздела фаз кристаллов и нанообъектов. Созданы предпосылки для разработки принципиально новых оптических приборов и обнаружения физических явлений. Разработано и обосновано новое научное направление в поляризационной оптике – сочетание (комбинация) поляриметрии и эллипсометрии.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах

1. Хасанов Т. Развитие метода эллипсометрии применительно к исследованию оптических свойств одноосных кристаллов / Диссертация на соиск. уч. степ. канд. физ.-мат. наук. Новосибирск, 1988.

Статьи, опубликованные в реферируемых изданиях:

2. Миронов Ф.С., Семенов А.И., Хасанов Т. Юстировка эллипсометра с фиксированным углом падения света на образец // Опт. и спектр. 1981. Т.51. Вып.3. С. 1095-1100.

3. Свиташев К.К., Хасанов Т. Измерение малых вращений плоскости поляризации // Опт. и спектр. 1983. Т.54. Вып.3. С. 538-539.

4. Мардежов А.С., Свиташев К.К., Хасанов Т. Компенсатор для спектральных исследований // Опт. и спектр. 1984. Т.57. Вып.2. С. 366-368.

5. Любинская Р.И., Мардежов А.С., Свиташев К.К., Хасанов Т. Определение оптических постоянных одноосных кристаллов с учетом поверхностной изотропной пленки из эллипсометрических измерений // Опт. и спектр. 1985. Т.59. Вып.2. С. 353-356.

6. Свиташев К.К., Хасанов Т. Учет оптической активности компенсатора при юстировке эллипсометра // Опт. и спектр. 1986. Т.61. Вып.2. С. 399-401.

7. Рыхлицкий С.В., Свиташев К.К., Соколов В.К., Хасанов Т. О влиянии многократного отражения на работу фазовой кварцевой пластинки // Опт. и спектр. 1987. Т.63. Вып.5. С. 1092-1094.

8. Хасанов Т. Об использовании измерительных зон в эллипсометрических измерениях // Опт. и спектр. 1988. Т.64. Вып.5. С.1087-1094.

9. Любинская Р.И., Мардежов А.С., Свиташев К.К., Хасанов Т. Определение четырех параметров системы изотропная пленка–ориентированный одноосный кристалл // Опт. и спектр. 1988. Т.65, Вып.3. С.632-636.

10. Свиташев К.К., Хасанов Т. Измерение деполяризованной компоненты, возникающей при прохождении линейно поляризованного света через плоскопараллельную анизотропную пластинку // Опт. и спектр. 1989. Т.66. Вып.1. С.218-220.

11. Вострикова Л.И., Махмудиан М.М., Свешникова Л.Л., Хасанов Т. Исследование оптической анизотропии пленок Ленгмюра-Блоджетт полидиацетиленов методом эллипсометрии // Опт. и спектр. 1997. Т.82. Вып.5. С.849-853.

12. Хасанов Т., Мардежев А.С., Яновская С.Г. Качурин Г.А., Kaitasov O., Эллипсометрические исследования отжига слоев при формировании в них светоизлучающих нанокристаллов Si // Опт. и спектр. 2001. Т.90. Вып. 6. С.924-927.
13. Хасанов Т. Способ точного определения оптических постоянных одноосных кристаллов из параметров компенсатора // Опт. и спектр. 2007. Т.102. Вып.1. С.1138-141.
14. Мутилин С.В., Хасанов Т. Показатель преломления тонкой однородной пленки SiO₂ // Опт. и спектр. 2008. Т.105. Вып.3. С.512-517.
15. Хасанов Т. Определение параметров фазосдвигающих пластинок // Кристаллография. 1992. Т.37. Вып.4. С.1041-1043.
16. Хасанов Т. Применение дробно-линейной функции для решения некоторых задач физики и техники // ДАН. 1997. Т.353. Вып.5. С.602-603.
17. Хасанов Т. Закон Малюса и несовершенство линейного поляризатора // ДАН. 1999. Т.365, Вып.3. С.333-335.
18. Atuchin V.V., Hasanov T., Kesler V.G., Kokh A.E., Pokrovsky L.D. Amorphization and chemical modification of (beta)-BaB₂O₄ surface by polishing // Optical Materials. 2003. V.23 (1-2), 387-394.
19. Хасанов Т. Чувствительный метод определения оптических постоянных одноосных кристаллов // Радиотехника и электроника. 2007. Т.52. Вып.9. С.1160-1166.
20. Хасанов Т. Определение собственных поляризаций поляризующих оптических систем // Автометрия. 1997. Вып.1. С.34-43.
21. Хасанов Т. Аттестация и средства контроля эллипсометров // Автометрия. 1997. Вып.1. С.81-95.
22. Атучин В.В., Григорьева Т.И., Мутилин С.В., Ремесник В.Г. Покровский Л.Д. Хасанов Т. Оптические свойства пленок TiO₂ // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2006.Т.3. Вып.2. С. 109-111.
23. Хасанов Т. Кристаллизация аморфной пленки SiO₂ на поверхности кристаллического кварца» // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2008. Т.5. Вып.2. С.122-127.
24. Атучин В.В., Гаврилова Т.А., Кочубей В.А., Покровский Л.Д., Хасанов Т., Микроморфология, структурные и оптические характеристики пленки Mo₂N на кремнии, полученной методом реактивного магнетронного распыления // Фундаментальные проблемы современного материаловедения .2007. Т.4. Вып.4.С.26-30.
25. Кочубей В.А., Покровский Л.Д., Хасанов Т. Структура и оптические свойства пленок нитридов молибдена, полученных методом реактивного магнитного напыления // Фундаментальные проблемы современного материаловедения.2007. Т.4. Вып.3. С.52-57.

26. Атучин В.В., Кочубей В.А., Покровский Л.Д., Хасанов Т. Структурные и оптические характеристики пленок V_2O_5 , полученных реактивным магнетронным распылением» // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2006.Т.3.Вып.1.С. 22-28.
27. Атучин В.В., Кочубей В.А., Покровский Л.Д., Сенченко Е.С., Хасанов Т. Оптические параметры пленок нитрида молибдена // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2008. Т.5. Вып.4.С 33-36.
28. Атучин В.В., Хасанов Т. Высокоточный бесконтактный метод определения химического состава кристаллов ниобата лития // *Опт. и спектр.*. 2009. Т.107. Вып.2. С. 225-230.
29. Григорьева Т.И., Хасанов Т.Х. Оптические постоянные наноразмерных пленок металлического титана // *Опт. и спектр.* 2010. Т.108. Вып.4. С. 629-636.

СТАТЬИ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ В СБОРНИКАХ

30. Мардежов А.С., Семенов А.И., Свиташев К.К., Хасанов Т. Температурная зависимость параметров компенсатора // *Эллипсометрия – метод исследования поверхности*. Новосибирск. Наука. 1983. С.137-140.
31. Хасанов Т. Определение параметров фазовой пластинки и однозонная методика эллипсометрических измерений. *Эллипсометрия: теория, методы, приложения.*: Новосибирск. Наука. 1987. С.79-83.
32. Атучин В.В. Хасанов Т. Определение показателей преломления на поверхности планарных оптических волноводов типа $LiNbO_3$ методом эллипсометрии // *Эллипсометрия: теория, методы, приложения*. Новосибирск. Наука. 1987. С. 171-174.
33. Хасанов Т. Определение линейного дихроизма и двулучепреломления при наличии оптической активности в плоскопараллельной пластинке из одноосного кристалла // *Эллипсометрия: теория, методы, приложения*. Новосибирск. Наука. 1991. С.98-102.
34. Мардежов А.С., Швец В.А., Хасанов Т. К вопросу об использовании фазосдвигающей пластинки для спектральных эллипсометрических измерений // *Эллипсометрия: теория, методы, приложения*. Новосибирск. Наука. 1991. С.102-107.

ПАТЕНТЫ

35. Свиташев К.К., Хасанов Т. //А. с. № 868498, БИ №36, с. 180 (1981).
36. Мардежов А.С., Хасанов Т. //А. с. № 1260697, БИ №36, с. 152 (1986).
37. Мардежов А.С., Хасанов Т. //Патент № 1675817 РФ, БИ №16, с. 274, (1997).
38. Хасанов Т. //А. с. №1829824, БИ №14, с. 486 (2000).
39. Рыхлицкий С.В., Селезнев А.Н., Хасанов Т. //Патент№ 2289831 РФ, БИ №35, с. 349, (2006).
40. Хасанов Т. //Патент № 2308066 РФ, БИ №28, с. 662 (2007).

ПРЕПРИНТЫ

41. Григорьева Т.И., Зилинг К.К., Мардежов А.С., Хасанов Т. Эллипсометрическое определение толщины титана для целей волноводной оптики // Препринт ИФП СО АН СССР.3 – 85. Новосибирск.1985.10 с.
42. Любинская Р.И., Мардежов А.С., Швец В.А., Хасанов Т. // Алгоритмы и программы для анализа результатов эллипсометрических измерений. 1. Однослойные структуры // Препринт ИФП СО АН СССР. 1-86. Новосибирск. 1986. 39 с.
43. Хасанов Т. Юстировка и аттестация эллипсометров // Препринт ИФП СО АН СССР. 7-90. Новосибирск. 1990. 32 с.

Хасанов Тохир

Поляриметрия и эллипсометрия в исследовании поляризующих оптических систем.

Автореферат дисс. на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук

Подписано в печать 28 июня 2010. Заказ №
Формат 60x90/32. Усл. печ. л. 2. Тираж 100 экз.

Отпечатано «Документ-Сервис»,
630090, Новосибирск, ул. Институтская 4/1