

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Оптических информационных технологий
(полное название кафедры)

Утверждаю

Зав. кафедрой _____

В.А.Лабусов
(подпись, инициалы, фамилия)

«__» _____ 2021 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

Дудкина Софья Павловна
(фамилия, имя, отчество студента – автора работы)

Модернизация эллипсометра ЛЭФ-2 для обеспечения возможности спектральных измерений.
(тема работы)

Физико-Технический Факультет
(полное название факультета)

Направление подготовки 12.03.02 «Оптехника»
(код и наименование направления подготовки бакалавра)

**Руководитель
от НГТУ**

Нечаев Виктор Георгиевич
(фамилия, имя, отчество)
к.т.н., доцент
(ученая степень, ученое звание)

(подпись, дата)

**Руководитель
от организации**

Шаяпов Владимир Равильевич
(фамилия, имя, отчество)
к.ф.-м.н., с.н.с.
(ученая степень, ученое звание)

(подпись, дата)

**Автор выпускной
квалификационной работы**

Дудкина Софья Павловна
(фамилия, имя, отчество)
ФТФ ФО-71
(факультет, группа)

(подпись, дата)

Новосибирск 2021

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Оптических информационных технологий
(полное название кафедры)

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой Лабусов В.А.
(фамилия, имя, отчество)

(подпись, дата)

**ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ БАКАЛАВРА**

студенту Дудкиной Софье Павловне
(фамилия, имя, отчество)

Направление подготовки 12.03.02 Опотехника
(код и наименование направления подготовки бакалавра)

Физико-технический факультет
(полное название факультета)

Тема Модернизация эллисометра ЛЭФ-2 для обеспечения возможности
спектральных измерений.
(полное название темы выпускной квалификационной работы бакалавра)

Исходные данные (или цель работы) Создание на базе лазерного эллисометра ЛЭФ-2 оптической системы,
позволяющей проводить нулевые эллисометрические измерения при разных длинах
волн.

Структурные части работы аннотация, введение, литературный обзор, основная часть, перспективы работы,
заключение, техника безопасности, список литературы

АННОТАЦИЯ

Структура ВКР на тему «Модернизация эллипсометра ЛЭФ-2 для обеспечения возможности спектральных измерений» включает в себя: введение, литературный обзор, две главы, заключение, технику безопасности, 25 источников используемой литературы, 38 страниц текста, 5 таблиц, 9 рисунков.

Цель исследования создание на базе лазерного эллипсометра ЛЭФ-2 оптической системы, позволяющей проводить нулевые эллипсометрические измерения при разных длинах волн.

Во введении рассматривается актуальность темы ВКР, основные цели и задачи работы.

В литературном обзоре рассматриваются основы метода эллипсометрии, способы эллипсометрических измерений, различные типы эллипсометров, примеры модификации нулевых эллипсометров. На основе анализа литературных данных сформулированы задачи работы.

В первой главе представлена схема экспериментальной установки с выполненной модернизацией и методика измерений, описан процесс юстировки эллипсометра, приведены результаты тестовых измерений.

Во второй главе рассмотрены возможные перспективы данной работы.

В заключении сделаны выводы о выполненной работе.

В приложении приведены правила техники безопасности при работе с эллипсометрами и правила противопожарной безопасности.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ	8
1.1. Метод эллипсометрии	8
1.2. Оборудование для эллипсометрических измерений	12
1.3. Примеры модификаций эллипсометра ЛЭФ-3М	15
1.4. Возможности многоволновых и спектральных эллипсометрических измерений. Обоснование и задачи работы.....	17
2. МОДЕРНИЗАЦИЯ ЭЛЛИПСОМЕТРА ЛЭФ-2.....	20
ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ	20
2.1. Описание экспериментальной установки.....	20
2.2. Юстировка эллипсометра.....	23
2.3. Тестовые эллипсометрические измерения.	27
2.3.1. Методика измерений	27
2.3.2. Измерения поверхности образца кварцевого стекла	27
2.3.3. Измерения тонкопленочных структур	28
3. ПЕРСПЕКТИВЫ РАБОТЫ	30
3.1. Система из двух линз (склейка).....	30
3.2. Оптическая система, телецентрическая в пространстве изображений, с собирающей и рассеивающей линзами	30
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	33
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	34
ПРИЛОЖЕНИЕ	37

ВВЕДЕНИЕ

Эллипсометрия – это неразрушающий поляризационно-оптический метод для исследования поверхностей и тонкопленочных структур. По сравнению с другими оптическими методами эллисометрия обладает наибольшей точностью измеряемых величин. Если в спектрофотометрии коэффициенты отражения и пропускания можно измерить с точностью 2-3 значащих цифры, то эллипсометрические измерения позволяют определить параметры поляризации отраженного света с точностью 4-5 значащих цифр. Параметры поверхностей и структур (толщины пленок, показатели преломления и коэффициенты экстинкции) обычно определяются из исходных оптических величин путем решения обратной задачи. Высокая точность исходных данных приводит в конечном итоге к более достоверным результатам решения обратных задач, а также позволяет выбрать математическую модель, более точно соответствующую реальному образцу.

Методы эллипсометрии подразделяются на фотометрические и нулевые. Нулевой метод обладает наивысшей точностью измерений, но обычно реализован в эллипсометрах, работающих на единственной длине волны. В то же время спектральные эллипсометрические измерения дают возможности исследования материалов, недоступные для монохроматических методов. В связи с этим задача создания эллипсометрического метода, сочетающего в себе нулевой метод и спектральный режим измерений, очень актуальна.

Цель данной работы – создание на базе лазерного эллипсометра ЛЭФ-2 оптической системы, позволяющей проводить нулевые эллипсометрические измерения при разных длинах волн.

Для выполнения данной цели решены следующие задачи:

- Установлен селективный фотоприемник, с помощью которого определялись положения гашения пучка света на выходе;
- Проведена юстировка эллипсометра ЛЭФ-2, позволившая с высокой точностью определить нулевые положения анализатора, поляризатора и компенсатора;

- Проведены тестовые измерения образцов поверхности кварцевого стекла, тонких пленок термического оксида и поливинилового спирта на кремниевых подложках.

В результате работы получена эллипсометрическая система, обладающая высокой точностью измерений. Эта система имеет перспективы развития за счет установки источников белого света, в том числе, работающих в ИК области спектра.

1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1. Метод эллипсометрии

Эллипсометрия - это метод поляризационно-оптических исследований, применяемый для твердых и жидких сред или поверхностей [1-4]. Данный метод основан на анализе амплитудных и фазовых изменений световой волны при взаимодействии с исследуемым образцом. Электрическую составляющую светового луча можно разложить на две компоненты поляризации: параллельную плоскости падения (p -компонента) и перпендикулярную ей (s -компонента). После отражения луча от образца меняются амплитуды этих компонентов и разность фаз между ними. Данные изменения можно выразить в виде уравнения:

$$\rho = \operatorname{tg}\psi e^{i\Delta} = \frac{R_p}{R_s}, \quad (1.1)$$

где ρ – относительный коэффициент отражения; ψ и Δ – эллипсометрические параметры; R_p и R_s – амплитудные коэффициенты отражения для p - и s -компонент электрического вектора [1]. Это уравнение называется основным уравнением отражательной эллипсометрии. Эллипсометрические параметры ψ и Δ зависят от оптических констант исследуемой поверхности – показателя преломления n и коэффициента экстинкции k . При наличии на поверхности образца пленок ψ и Δ будут зависеть также и от оптических констант и толщин пленок.

Эллипсометрия разделяется на монохроматическую и спектральную. Если измерения выполняются на одной длине волны света, то такая эллипсометрия называется монохроматической. Для спектральной эллипсометрии характерны измерения в некотором диапазоне длин волн света [1-3].

Существует два метода эллипсометрических измерений – фотометрический и нулевой [1-3]. Фотометрический метод заключается в измерении интенсивности отраженного от образца света при заданных положениях оптических элементов эллипсометра. Затем по этим интенсивностям определяются эллипсометрические параметры ψ и Δ .

В нулевом методе необходимо добиться полного гашения светового излучения на выходе (на фотоприемнике) поворотом оптических элементов. Нулевой метод измерений наиболее точен и абсолютно не чувствителен к колебаниям в интенсивности источника излучения. На нулевом методе измерений основана работа эллипсометров ЛЭФ-2 и ЛЭФ-3М, серийно производимых в СССР в 70-80-е годы прошлого века. Но у него есть и недостатки. Нулевая схема измерений слабо поддается автоматизации и требует достаточно продолжительное время на выполнение одного измерения. Тем не менее, в литературе имеются примеры автоматизации и компьютеризации нулевых измерений. В частности, в работе [5] показана возможность автоматических измерений за счет установки на эллипсометр ЛЭФ-3М-1 шаговых двигателей, управляемых компьютером.

Нулевой метод обладает предельно высокой точностью, но, чтобы достичь этой точности, нужно выполнить целый ряд требований к компонентам эллипсометра. В статье [6] представлены методы повышения точности эллипсометрии для определения показателей преломления и толщины сверхтонких термических пленок SiO_2 на подложке из кремния. Измерения проводились на эллипсометре ЛЭФ-3М с источником света He – Ne лазера с длиной волны 632,8 нм и эллипсометрической конфигурации поляризатор – компенсатор – образец – анализатор PCSA. Усовершенствованная процедура юстировки эллипсометра была разработана для минимизации погрешности при измерении угла и для проверки анизотропии образца (рис. 1.1). Результаты работы показывают, что показатели преломления ультратонких пленок термического оксида толщиной

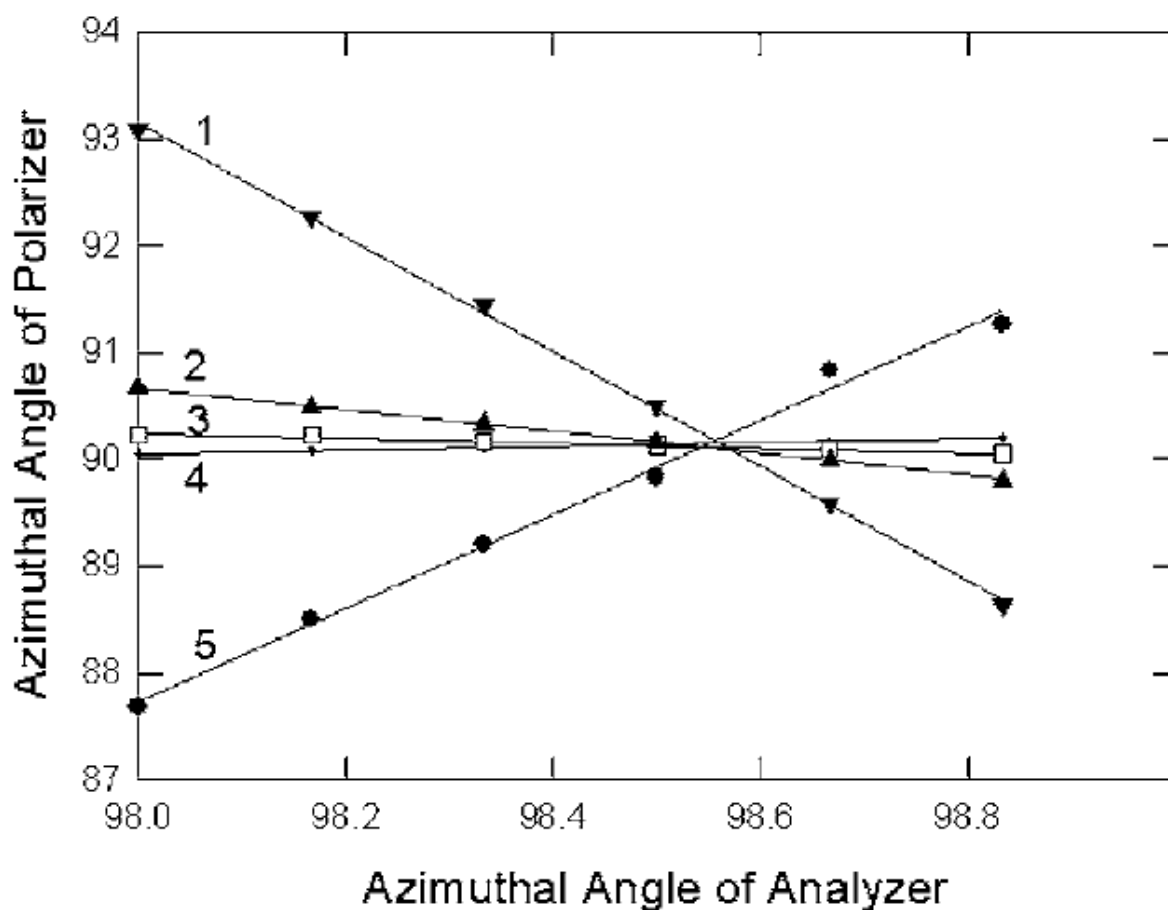


Рис. 1.1. Методика юстировки эллипсометра ЛЭФ-3М по работе [6].

2,1–8 нм, полученных несколькими различными методами, находятся в диапазоне $1,475 \pm 0,003$.

Вопросы испытаний, аттестации и средства контроля эллипсометров обсуждаются в статье [7]. Решение этих вопросов позволит избежать искажений результатов, обусловленных несовершенством прибора и его оптических элементов. Рассматривается каждый конкретный оптический элемент, входящий в состав схемы измерений и его параметр несовершенства или погрешности.

1. Источник излучения. Изначально световой поток, излучаемый источником, имеет конечную расходимость, монохроматичность и стабилен по интенсивности. Влияние может быть заметно только при углах падения, близких к углу Брюстера.

2. Круговой поляризатор. При нулевой схеме эллипсометра поляризатор почти не влияет на полученные результаты измерений, так как на выходе кругового поляризатора поляризация отличается от круговой. Это требование достигается в зависимости от условий настройки и в зависимости от температуры окружающей среды, а также зависит от качества используемой четвертьволновой пластинки.

3. Поляризатор. Линейный поляризатор имеет конечную эллиптичность, которую можно считать несовершенством.

4. Компенсатор. Компенсатор и исследуемая система (образец) создают фазовые сдвиги, благодаря такой системе эти сдвиги взаимно компенсируются.

5. Исследуемая система (образец). Объект исследований должен обладать отличными от нуля коэффициентом зеркального отражения. С помощью предметного столика, диафрагм в плечах поляризатора и анализатора, и угломерного устройства для определения угла падения и отражения устанавливается подходящий угол падения излучения на образец.

6. Анализатор. Необходимо, чтобы он мог точно измерять азимут вектора электрического поля электромагнитной волны. Его точность зависит от остаточной эллиптичности.

7. Фотоприемник. Для использования в нулевой схеме измерений важной характеристикой фотоприемника является порог чувствительности, особенно при измерении вблизи угла Брюстера и у границы раздела двух диэлектриков. А также важны характеристики фотоприемного устройства при определении юстированных приборных параметров.

Автор работы [7] предлагает способы контроля величины параметра несовершенств для каждого элемента оптической схемы, а также описываются некоторые возможные причины искажения результатов эллипсометрических измерений. Показано, что можно успешно использовать в качестве средств аттестации эллипсометров плавленый и кристаллический кварц, структуру Si/SiO₂.

Для того, чтобы определить параметры отражающей системы (n и k поверхности и слоев на ней, толщины слоев), нужно решить обратную задачу эллипсометрии. Обратная задача эллипсометрии (ОЗЭ) – определение искомым оптических параметров образца по измеренным значениям ψ и Δ [4]. Эта задача не имеет аналитического решения в общем виде. Поэтому для ее решения привлекаются разнообразные численные методы. Другими словами, в общем виде это есть задача минимизации определенной целевой функции. Вид этой функции выбирается из физических соображений так, чтобы в пространстве искомым параметров координаты ее минимума соответствовали решению.

1.2. Оборудование для эллипсометрических измерений

В настоящее время несколько производителей изготавливают эллипсометры, работающие, главным образом, по фотометрическому методу. Приборы, работающие по нулевому методу, серийно производились ранее, но в настоящее время почти не выпускаются. Рассмотрим описание некоторых моделей, выпускаемых наиболее известными российскими и зарубежными производителями.

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН (ИФП СО РАН) является одним из старейших разработчиков и производителей эллипсометров в СССР и России. В данной работе используется эллипсометр ЛЭФ-2, который являлся первой моделью, выпускаемой серийно в 70-е гг. 20 века. Позже в ИФП СО РАН был разработан эллипсометр ЛЭФ-3, который производился на Феодосийском приборостроительном заводе. Эта модель стала наиболее массовой по числу выпущенных приборов. Обе модели эллипсометров работают по нулевому методу.

В последние годы ИФП СО РАН производит несколько моделей эллипсометров для различных задач [8]:

1. Лазерный эллипсометр ЛЭФ-777 для пооперационного технологического контроля в микро- и наноэлектронике. Прибор является первой в РФ промышленно-ориентированной моделью автоматического эллипсометра для технологического контроля в составе производственной линии. Эллипсометр позволяет с высокой производительностью и точностью осуществлять контроль тонких пленок различных материалов на образцах размером до 200 мм.
2. Эллипсометрический комплекс для электрохимических исследований *in situ* «ЭЛЛИПС-101ЭЛХ». Эллипсометрический комплекс предназначен для *in situ* диагностики поверхности металлов и полупроводников методом быстродействующей эллипсометрии в процессах электрохимического окисления и роста тонкопленочных оксидных структур. Разработанный комплекс наряду с традиционными эллипсометрическими задачами измерения оптических констант и толщин растущих оксидных пленок позволяет проводить оценку пористой структуры и рельефа поверхности растущего анодного оксида.
3. Быстродействующий прецизионный эллипсометр для контроля ростовых процессов в реальном времени. Эллипсометр позволяет с высокой точностью и стабильностью в масштабе реального времени осуществлять мониторинг различных быстропротекающих процессов, таких как рост-травление пленок, параметров адсорбции/десорбции, характеристик высокотемпературных нагревов и других.
4. Аналитический комплекс для характеристики свойств поверхности твердого тела методом полной эллипсометрии «ЭЛЛИПС-АМ». Аналитический комплекс «ЭЛЛИПС-АМ» предназначен для нанодиагностики поверхности шероховатых, неоднородных и анизотропных материалов и слоистых наноструктур методом полной эллипсометрии. Работа комплекса основана на измерениях полного вектора Стокса или 16 элементов матрицы Мюллера, которые дают исчерпывающую информацию об оптических свойствах анизотропной,

а также несовершенной диффузно-рассеивающей поверхности деполаризующих материалов, применяемых в наноиндустрии.

5. «Эллипс 1991» [9]. Комплекс обеспечивает измерения параметров многослойной структуры (до 6 слоев), определение параметров n и k и толщин всех слоев в рабочем спектральном диапазоне, автоматический подбор параметров образца для фиттинга измеренных спектров.

Данные эллипсометры применяются в научных учреждениях, а также в промышленных предприятиях высокотехнологичных областей производства, занимающихся научно-исследовательскими и опытно-технологическими работами в области создания современных функциональных материалов полупроводниковой микро- и наноэлектроники.

Ведущие мировые производители эллипсометров, такие как Woolam, Horiba Jobin Yvon предлагают различные варианты схем работы эллипсометров (с вращающимся анализатором, компенсатором, с электрооптической модуляцией и др.). В зависимости от модели, эти эллипсометры работают в спектральном диапазоне от вакуумного ультрафиолета до 25 мкм, но их стоимость достаточно высока.

В последнее время в качестве источников света используются полупроводниковые светодиоды. Например, ЗАО Концерн «Наноиндустрия» производит эллипсометр «ЭЛЬФ», в котором широкий спектральный диапазон (270-1000 нм) обеспечен за счет применения осветителя на основе набора светодиодов [10]. Компания Film Sense производит фотометрические эллипсометры работающие при нескольких значениях (4-6) длин волн, излучаемых светодиодами [11]. Один из вариантов схемы эллипсометрических измерений, который планируется осуществить в данной работе, подобен идее Film Sense, с той лишь разницей, что измерения будут выполняться нулевым методом, а в качестве источников света будут использоваться лазерные диоды.

1.3. Примеры модификаций эллипсометра ЛЭФ-3М

Так как целью данной работы является обеспечение спектральных измерений на нулевом эллипсометре ЛЭФ-2, рассмотрим опубликованные результаты исследований, выполненных с помощью модифицированных эллипсометров ЛЭФ-3М. Модификация заключалась в обеспечении возможности спектральных измерений. Эллипсометр ЛЭФ-2 устроен аналогично ЛЭФ-3М (рис. 1.2), поэтому эти результаты так же будут актуальны и для ЛЭФ-2. Работ, непосредственно относящихся в модификации эллипсометра ЛЭФ-2, в опубликованных источниках не найдено.

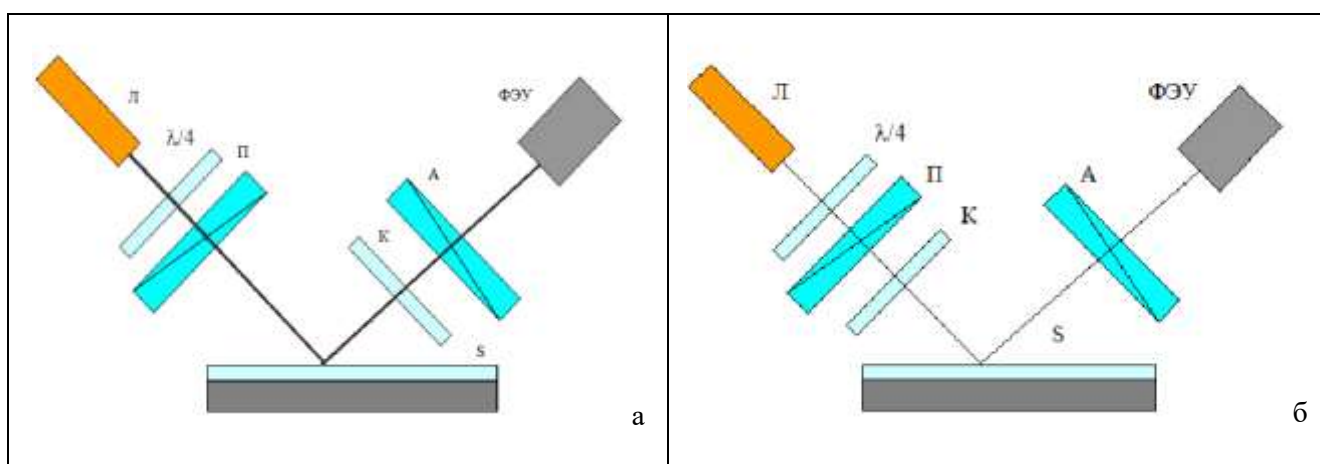


Рис. 1.2. Оптические схемы эллипсометров ЛЭФ-2 (а) и ЛЭФ-3М (б).

Оптические элементы эллипсометров ЛЭФ-2 и ЛЭФ-3М позволяют проводить измерения в широком диапазоне длин волн (350-2700 нм). Обычно штатный компенсатор этих эллипсометров подходит только для работы на длине волны 632,8 нм, что является проблемой при переходе в спектральный режим измерений. Эту проблему можно решить двумя способами.

Первым способом является удаление компенсатора из оптической схемы. В результате получается схема «поляризатор-образец-анализатор», в которой реализуется эллипсометрический метод Битти. [12-13].

В статье [12] авторы рассматривают оптические свойства гадолиния в жидком и твердом состояниях. Оптические постоянные измерены на

эллипсометре ЛЭФ-3М эллипсометрическим методом Битти в области спектра 0.48–2.6 мкм. В статье [13] авторы таким же методом исследовали электронную структуру чистой и окисленной поверхности алюминия при комнатной температуре. В статье [14] представлена блок-схема прибора, основанного на схеме «поляризатор-образец-анализатор» для измерения показателя преломления и контроля толщины пленок в процессе изготовления пленочных структур. Для работы был использован эллипсометр, работающий по фотометрическому принципу. Так как компенсатор не использовался, эллипсометр отличался меньшим временем измерений. Поэтому создается возможность для измерений использовать любую длину волны, а значит, любой (в разумных пределах) лазер. Также это позволяет использовать данный эллипсометр в режиме автоматических измерений.

Второй способ обеспечения возможности спектральных измерений – использование ахроматического компенсатора. Ахроматические компенсаторы достаточно распространены в спектральных фотометрических эллипсометрах, и, как правило, представляют собой ромбы Френеля [9]. Использование ахроматических компенсаторов совместно с нулевым методом для выполнения спектральных измерений практически не освещается в литературе. Примером такого решения является работа [15], но в ней не указан тип компенсатора и диапазон длин волн.

Предлагаются также более сложные варианты модификации нулевых эллипсометров. В статье [16] рассмотрены метрологические преимущества и особенности метрологической аттестации эллипсометра, сочетающего в себе «нулевой» и фотометрический подходы. В качестве базового эллипсометра используется ЛЭФ 3М-1, работающий по нулевой методике. Он был усовершенствован с помощью приставки, позволяющей измерять в автоматизированном процессе. В полуавтоматическом режиме возможно полное измерение анизотропии. Для этого проводятся четыре измерения при четырех комбинациях углов P и C , что дает возможность определить полную матрицу Мюллера исследуемой системы.

1.4. Возможности многоволновых и спектральных эллипсометрических измерений. Обоснование и задачи работы

Измерения на одной длине волны не позволяют однозначно определить толщину прозрачной пленки, так как эллипсометрические углы пси и дельта периодически повторяются для разных толщин, которые связаны функциональным соотношением

$$d = d_{\text{элл}} + md_0, \quad (1.2)$$

где $d_{\text{элл}}$ – рассчитанная для данных ψ и Δ толщина, m – целое число, d_0 – период толщины, определяемый выражением [4],

$$d_0 = \frac{\lambda}{2\sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi_0}}. \quad (1.3)$$

где φ_0 – угол падения света на образец.

Многоугловые измерения не решают проблему неоднозначности из-за слабой зависимости d_0 от φ_0 . Однако, измерения даже на двух длинах волн позволяют однозначно определить любую толщину.

Для поглощающих пленок возможна ситуация, когда луч не доходит до границы пленка-подложка и измеренные пси и дельта не будут содержать информацию о толщине пленки. Возможность перехода на длину волны при которой пленка слабо поглощает свет помогает определить толщину в данной случае. Для некоторых видов измерений требуется перейти на ту длину волны, при которой пленка обладает наибольшим поглощением. Например, это необходимо в ситуации, когда фотометрический эллипсометр не позволяет провести точное измерение в полосе поглощения пленки.

Измерения при нескольких длинах волн (3-5) позволяет установить дисперсию показателя преломления в спектральной области, находящейся

достаточно далеко от края поглощения. Дисперсия рассчитывается по формулам Коши, Зельмейера, Гартмана [17].

Спектральная эллипсометрия обладает множеством возможностей в исследовании материалов [18-25]. Среди них определение строения многослойных и градиентных структур [18], фазового состава [19, 20], микроструктуры и плотности пленок [21], анализ сенсорных свойств оптических сенсоров [22], исследование процессов роста пленок *in situ* [23]. Методом спектральной эллипсометрии определяются справочные (табличные) спектры оптических констант важнейших материалов, например, полупроводников [24]. В спектральной эллипсометрии спектры оптических моделируются стандартными зависимостями, такими как уравнения Коши, Зельмейера и другими, более сложными (Форохи-Блумера, Таука-Лоренца) [25].

Представленный обзор литературы показывает, что максимально высокая точность достигается при нулевом методе измерений, а максимальная информативность – при спектральном методе измерений. В то же время, нулевые эллипсометры работают, как правило, на единственной длине волны, а спектральные эллипсометры обычно функционируют на основе фотометрического метода. Уникальные возможности эллипсометрических измерений дало бы сочетание нулевого метода и спектрального режима измерений.

Целью данной выпускной квалификационной работы является реализация эллипсометрических измерений в спектральном режиме с сохранением нулевого метода. Для этого было запланировано построить оптическую систему на базе модифицированного нулевого эллипсометра ЛЭФ-2.

В рамках работы нужно решить ряд задач:

1. Установка селективного фотоприёмника, работающего в видимом диапазоне излучения, вместо штатного ФЭУ, поставляемого в комплекте с эллипсометром.

2. Оценка метрологических свойств полученной системы.
3. Переход к спектральному режиму измерений при использовании многоволновых источников освещения.
4. Проведение измерений на тестовых образцах.

2. МОДЕРНИЗАЦИЯ ЭЛЛИПСОМЕТРА ЛЭФ-2 ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

2.1. Описание экспериментальной установки

Для выполнения эллипсометрических измерений в данной работе использовался лазерный нулевой эллипсометр ЛЭФ-2, в котором в качестве приемника света был установлен акустооптический спектрометр «Кварц» (рис. 2.1). Эллипсометр ЛЭФ-2 был разработан в ИФП СО РАН в 1977 году и изготовлен на Опытном заводе СО РАН. Спектрометр «Кварц» – разработка Физико-технологического института имени К.А. Валиева Российской академии наук (ФТИАН им. К.А. Валиева РАН).

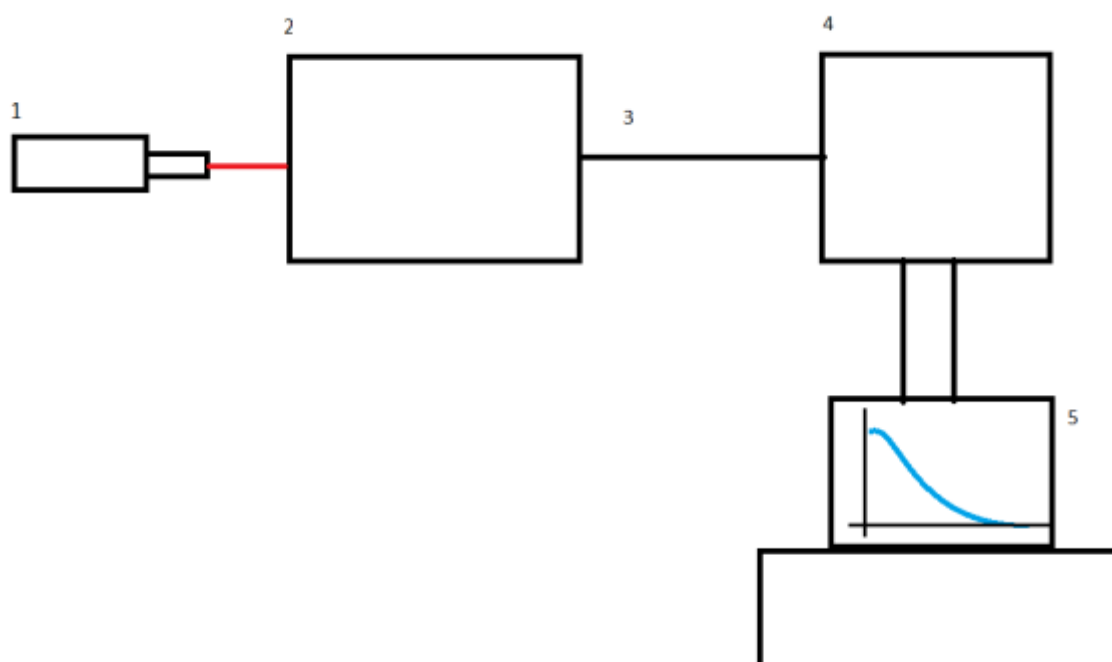


Рис. 2.1. Схема измерительной установки.

1 – гелий-неоновый лазер, 2 – эллипсометр ЛЭФ-2, 3 – волоконно-оптический кабель,
4 – спектрометр «Кварц», 5 – компьютер.

При юстировке данной измерительной установки и тестовых измерениях в качестве источника света использовался гелий-неоновый лазер ЛГ-208Б с длиной волны излучения 632,8 нм. В качестве поляризатора и анализатора в эллипсометре ЛЭФ-2 использованы призмы Глана-Фуко из исландского шпата. Физически поляризатор и анализатор представляют собой одинаковые элементы. Поляризационные элементы помещаются в собственные лимбы и могут свободно вращаться. Нулевому отсчету азимута этих элементов соответствует плоскость наибольшей степени поляризации. Для установления соответствия нулевых отсчетов и плоскости падения проводилась специальная юстировка, суть которой будет описана ниже.

Эллипсометр ЛЭФ-2 устроен по схеме PSKA, что означает расположение компенсатора в плече анализатора, то есть после образца. Рассматривая ход луча в данной схеме можно сказать, что световое излучение на выходе из источника света поляризовано линейно. Далее свет от лазера проходит через четвертьволновую пластинку, и поляризация становится круговой. Затем свет проходит через поляризатор и становится линейно поляризованным. При отражении от образца поляризация изменяется на эллиптическую. Затем световое излучение проходит через компенсатор – четвертьволновую пластинку, которая эллиптическую поляризацию преобразует снова в линейную. После компенсатора свет попадает на анализатор, который является линейным поляризатором.

Ранее гашение пучка осуществлялось визуально на специальном экране. Это ограничивало точность измерений. В эллипсометре ЛЭФ-2 предусмотрена возможность гашения пучка с помощью штатного ФЭУ. В этом случае для обеспечения спектральных измерений необходимо, чтобы селекция длины волны происходила сразу после источника света. В случае белого источника, например, галогенной лампы, пучок после монохроматора, возможно, будет иметь недостаточную интенсивность. Введение в схему измерений спектрометра «Кварц» решает данные проблемы, так как он выполняет селекцию длины волны и содержит в качестве фотоприемника ФЭУ.

«Кварц» (рис. 2.2а) – скоростной акустооптический спектрометр, предназначенный для измерения спектральных характеристик оптического излучения, находящегося в спектральном диапазоне длин волн 400-820 нм. Погрешность определения длины волны не превышает 0,7 нм, спектральная чувствительность $1 \cdot 10^9$ ср*м³/Вт.

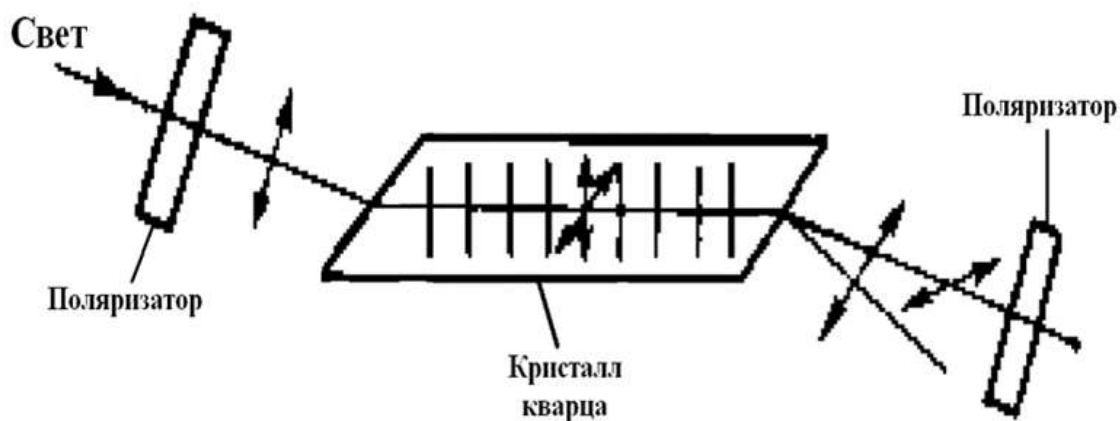
В акустооптическом спектрометре «Кварц» используется перестраиваемый акустооптический фильтр в качестве дисперсионного элемента, в основу работы которого положено взаимодействие излучения в оптическом диапазоне с динамической решеткой, созданной в кристалле фильтрующего элемента ультразвуковой волной (рис. 2.2б). Следствием принципов работы акустооптического фильтра является возможность быстрой перестройки в рабочем спектральном диапазоне без каких-либо механических перемещений.

Для передачи света от эллипсометра «ЛЭФ-2» к спектрометру «Кварц» используется оптоволоконный кабель, соединенный с эллипсометром с помощью специально разработанного переходника через коллиматор 74-UV. Переходник установлен на место штатного ФЭУ. В спектрометре конструктивно предусмотрен разъем SMA 905 для соединения с оптоволоконным кабелем.

Компьютер, работающий совместно со спектрометром «Кварц», оцифровывает электрический сигнал на выходе ФЭУ, пропорциональный интенсивности света, достигшего ФЭУ. Зависимость интенсивности от времени можно наблюдать на мониторе компьютера и, следовательно, осуществлять гашение пучка.



a



б

Рис. 2.2. Общий вид спектрометра «Кварц» (*a*) и ход лучей в спектрометре (*б*).

2.2. Юстировка эллипсометра

Нулевой метод эллипсометрических измерений обладает самыми высокими метрологическими характеристиками по сравнению с другими методами. Для достижения максимальной точности измерений эллипсометр юстировался по методике, разработанной д. т. н. Б. М. Аюповым [6]. Методика позволяет добиться очень высокой точности измерения параметров ψ и Δ .

В данной работе применена немного упрощенная процедура юстировки по сравнению с процедурой, предложенной в [6]. Заранее были известны примерные нулевые положения поляризатора, анализатора и компенсатора. До настоящей работы эллипсометр ЛЭФ-2 не использовался несколько лет, поэтому старые положения могли не соответствовать истинным. В связи с этим была выполнена новая юстировка эллипсометра, при этом в качестве фотоприемника использовался спектрометр «Кварц». Юстировка выполнялась в положении плечей эллипсометра «на просвет» (90°) и при двух углах падения света (70° и 80°) на специальный юстировочный образец. Этот образец представлял собой плоскопараллельную стеклянную пластину с хорошо отполированной поверхностью. Главное требование к юстировочному образцу – отсутствие оптической анизотропии (двулучепреломления). Чтобы минимизировать остаточную анизотропию, рабочая поверхность образца полировалась пламенем. Данный образец является частью комплекта к эллипсометру ЛЭФ-3М.

Прежде всего, для каждого положения плеч эллипсометра поляризационные элементы прибора были установлены в примерные нулевые положения. Затем были установлены разные угловые положения поляризатора с шагом $10'$. Для каждого положения поляризатора отыскивалось положение гашения выходящего пучка света путем вращения лимбов компенсатора и анализатора. Полученные результаты представлены в табл. 2.1. Зависимости положений анализатора и компенсатора от азимутального угла поляризатора, полученные при трех разных положениях плеч эллипсометра, для идеально изотропного образца должны пересекаться в одной точке. В моем случае (рис. 2.3) эти зависимости не пересеклись в одной точке, но образовали треугольную область, в пределах которой азимутальные углы имеют отклонение $\pm 1'$. Это отклонение очень мало, что указывает на практически идеальную изотропию юстировочного образца, а также на то, что положение плоскости падения не изменяется при изменении угла падения света на

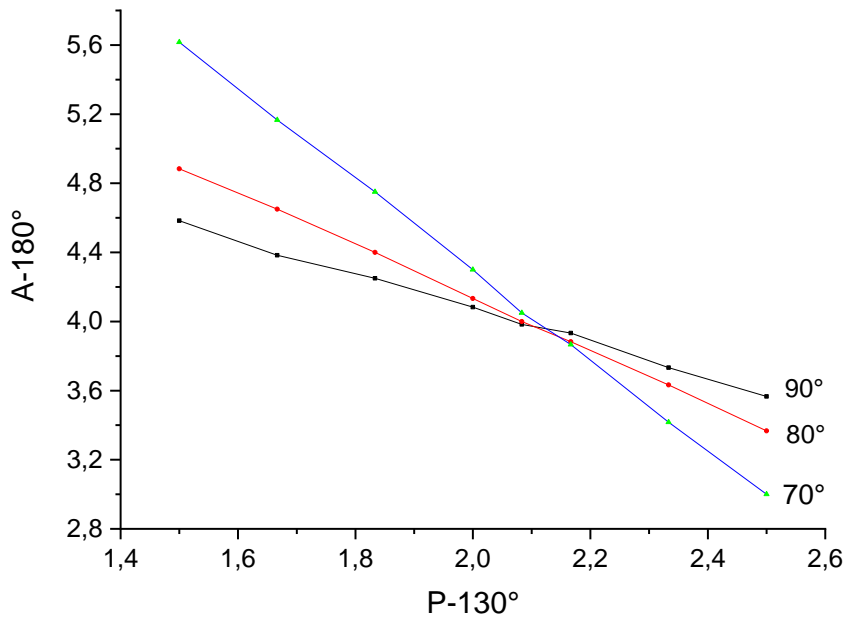
образец (т.е. механическая юстировка плеч эллипсометра, выполненная на заводе, достаточно точна).

В результате по графикам (рис. 2.3) определены нулевые положения поляризационных элементов эллипсометра: $P_0=132^\circ 08' \pm 1'$, $A_0=183^\circ 57' \pm 1'$, $C_0=68^\circ 51' \pm 1'$. Нулевое положение поляризатора соответствует направлению поляризации в плоскости падения (р-поляризация), нулевое положение анализатора – направлению поляризации перпендикулярно плоскости падения (s-поляризация), нулевое положение компенсатора – направлению так называемой быстрой оси (оси, вдоль которой фазовая скорость света максимальна).

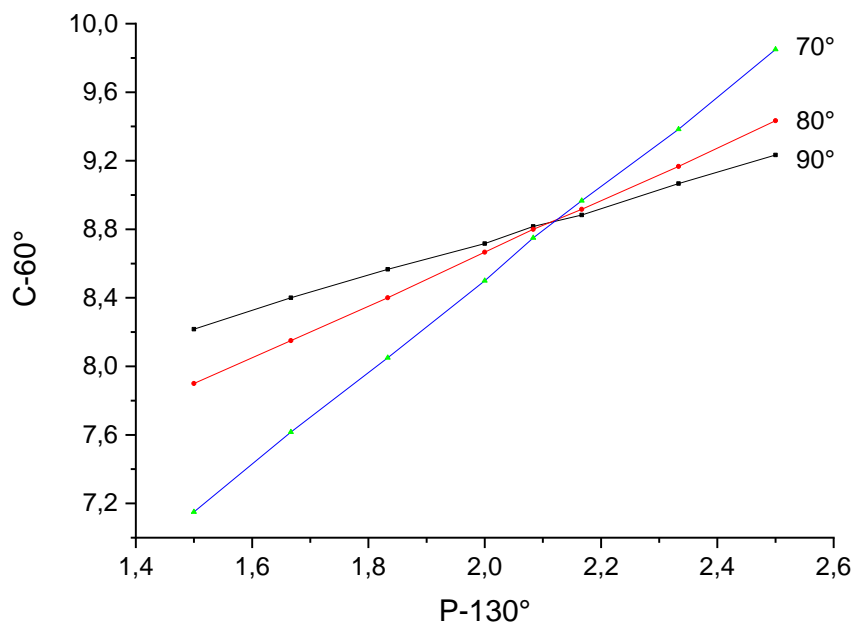
Положение P_0 определяет выбор зон при эллипсометрических измерениях. Значение A_0 используется при расчете эллипсометрического параметра Δ . Компенсатор при эллипсометрических измерениях устанавливается в положение C_0+45° или C_0-45° . В этом положении достигается наибольшая точность измерений [1].

Таблица 2.1. Угловые положения лимбов поляризатора, анализатора и компенсатора при юстировке.

P	90°		80°		70°	
	A	C	A	C	A	C
131°30'	184°35'	68°13'	184°35'	67°54'	183°37'	67°09'
131°40'	184°23'	68°24'	184°39'	68°09'	185°10'	67°37'
131°50'	184°15'	68°34'	184°24'	68°24'	184°45'	68°03'
132°00'	184°05'	68°43'	184°08'	68°40'	183°18'	68°30'
132°05'	183°59'	68°49'	184°00'	68°18'	184°03'	68°45'
132°10'	183°56'	68°55'	183°53'	68°55'	183°52'	68°58'
132°20'	183°44'	69°04'	183°38'	69°10'	183°25'	69°23'
132°30'	183°34'	69°14'	183°22'	69°26'	183°06'	69°51'



a



б

Рис. 2.3. Зависимости положений анализатора (*a*) и компенсатора (*б*) от азимутального угла поляризатора в положении плеч эллипсометра «на просвет» (90°) и при отражении света от юстировочного образца под углами падения 70° и 80°.

2.3. Тестовые эллипсометрические измерения.

2.3.1. Методика измерений

Для оценки качества юстировки были проведены тестовые измерения на поверхности кварцевого стекла и тонкопленочных структурах, подчиняющихся модели однослойной пленки (пленка термического оксида на кремнии). Использована двухзонная методика эллипсометрических измерений [4]. Суть данной методики заключается в том, что для определения ψ и Δ измеряются углы гашения поляризатора и анализатора в двух различных положениях (зонах). При измерениях было использовано положение компенсатора $C_0+45^\circ=113^\circ51'$. Этому положению соответствуют формулы для расчета ψ и Δ :

$$\psi = \frac{|P_1 - P_2|}{2}, \quad \Delta = A_1 + A_2 + R, \quad (2.1)$$

где P_1 , A_1 и P_2 , A_2 – углы гашения поляризатора и анализатора для первой и второй зон соответственно, R – это добавочное слагаемое для расчета Δ , вычисляемое как $R=180^\circ-2A_0=-7^\circ54'$.

2.3.2. Измерения поверхности образца кварцевого стекла

Первое тестовое измерение проведено на полированной поверхности образца кварцевого стекла. Этот образец выбран в связи с тем, что кварцевое стекло прозрачно в видимом диапазоне спектра, а его показатель преломления измерен на рефрактометре Пульфриха PR-2 с высокой точностью и равен 1,457. Измерения проведены при семи углах падения света на образец, результаты измерений приведены в табл. 2.2. Выяснилось, что ψ и Δ измеряются с погрешностью не более $2'$, за исключением измерений при углах падения, близких к углу Брюстера ($\arctg 1,457=55^\circ32'$). В окрестностях угла Брюстера имеет место высокая чувствительность ψ и Δ к неидеальности (шероховатость, остаточное двулучепреломление, наличие сверхтонких поверхностных пленок и пр.) границы раздела двух сред.

По результатам проведенных измерений ψ и Δ были рассчитаны «эффективные» константы n и k образца в приближении модели резкой границы раздела двух сред. Расчет проводился независимо для каждого угла падения. Получены отклонения значений n и k друг от друга только в третьем знаке после запятой (табл. 2.3).

2.3.3. Измерения тонкопленочных структур

Второе тестовое измерение было проведено на образце пленки термического оксида кремния на подложке из кремния (SiO_2/Si). Измерение было проведено при пяти углах падения на образец от 50° до 70° с шагом 5° (табл. 2.4). Показатель преломления и толщина пленки вычислены независимо для каждого угла падения по модели однослойной прозрачной пленки на подложке с известными оптическими константами кремния. Обнаружен разброс значений показателя преломления в третьем знаке после запятой ($n=1,461\pm 0,002$), а толщины – на уровне нескольких десятых нанометра ($d=113,6\pm 0,3$ нм).

Также были выполнены измерения пленок поливинилового спирта, полученных методом центрифугирования на подложках кремния. Вновь получены незначительные отклонения значений n и d пленки, вычисленных независимо для разных углов падения (табл. 2.5).

Таблица 2.2. Эллипсометрические измерения поверхности образца кварцевого стекла.

Угол падения, φ	P_1	A_1	P_2	A_2	ψ_s	Δ_s	ψ_p	Δ_p
50	123°31'	139°02'	140°51'	49°02'	8°40'	180°10'	8°38'	180°00'
56	132°49'	138°11'	131°26'	228°06'	0°42'	358°23'	0°44'	0°00'
60	125°07'	228°55'	130°06'	138°53'	7°00'	359°54'	7°00'	0°00'
65	146°42'	138°56'	117°34'	228°56'	14°34'	359°58'	14°35'	0°00'
70	110°27'	228°57'	153°48'	138°57'	21°41'	0°00'	21°40'	0°00'
75	160°17'	138°57'	103°59'	232°57'	28°09'	0°00'	28°10'	0°00'
80	97°59'	228°58'	116°14'	138°58'	34°08'	0°02'	34°07'	0°00'

Таблица 2.3. Оптические константы образца кварцевого стекла, вычисленные по модели границы полубесконечных сред.

Угол падения, φ	n	k
50	1,4586	-0,001
56	1,4581	-0,0007
60	1,4572	-0,0004
65	1,4578	-0,0003
70	1,4565	$1 \cdot 10^{-14}$
75	1,4578	$8 \cdot 10^{-16}$
80	1,4558	-0,001

Таблица 2.4. Эллипсометрические измерения образца SiO_2/Si .

Угол падения, φ	P_1	A_1	P_2	A_2	ψ_3	Δ_3	n	$d, \text{нм}$
50	185°01'	215°54'	79°23'	304°50'	52°49'	152°50'	1.460	113.9
55	78°36'	297°08'	185°32'	209°02'	53°28'	138°16'	1.462	113.6
60	185°24'	200°28'	79°02'	288°24'	53°11'	120°58'	1.461	113.5
65	79°37'	278°10'	184°23'	191°15'	53°23'	101°31'	1.463	113.4
70	182°36'	181°19'	81°20'	268°12'	50°38'	81°37'	1.460	113.6

Таблица 2.5. Эллипсометрические измерения образца PVA/Si .

№ образца	Угол падения, φ	P_1	A_1	P_2	A_2	ψ_3	Δ_3	n	$d, \text{нм}$
1	50°	86°39'	296°35'	178°50'	207°46'	46°06'	136°11'	1,5238	96,4
	60°	177°02'	193°32'	89°00'	282°46'	44°01'	108°08'	1,5233	96,3
	70°	90°22'	265°33'	175°29'	176°39'	42°34'	74°02'	1,5231	96,4
2	50°	100°29'	309°23'	163°57'	220°17'	31°44'	161°30'	1,512	31
	60°	156°49'	213°12'	107°24'	301°43'	24°43'	146°45'	1,516	31
	70°	114°38'	282°33'	149°10'	196°15'	17°16'	110°38'	1,527	31
3	50°	169°27'	29°00'	95°14'	117°15'	37°07'	138°05'	1,5181	320
	60°	102°22'	107°38'	162°56'	19°07'	30°17'	118°35'	1,5183	320
	70°	157°47'	04°20'	107°46'	92°48'	25°01'	88°58'	1,5152	321

3. ПЕРСПЕКТИВЫ РАБОТЫ

В результате проведенной работы обеспечена возможность выполнения на эллипсометре ЛЭФ-2 спектральных измерений. Наиболее разумное развитие работы – применение белых источников света с непрерывным спектром. Для того, чтобы заменить штатный источник излучения (гелий-неоновый лазер) эллипсометра ЛЭФ-2 на такие источники, потребуется использовать оптические схемы для формирования достаточно узконаправленного и параллельного пучка. Рассмотрим 2 наиболее подходящих варианта оптической системы. Расчеты aberrаций выполнены в программе Zemax.

3.1. Система из двух линз (склейка)

Один из способов устранения aberrаций в оптической системе – использование объективов в виде склейки из двух линз (рис. 3.1). По графику aberrаций (рис. 3.2) установлено, что aberrации на выходной поверхности первой линзы и на входной поверхности второй линзы имеют одинаковые значения, но с разными знаками. Они взаимно уничтожаются. Суммарная aberrация системы получается ниже, чем в случае одиночной собирающей линзы. Преимуществом данного технического решения является использование только одного элемента в оптической системе формирования пучка – склеенного объектива.

3.2. Оптическая система, телецентрическая в пространстве изображений, с собирающей и рассеивающей линзами

Другой способ формирования параллельного пучка – использование системы из двух линз, телецентрической в пространстве изображений (рис. 3.3). Оптическая система, телецентрическая в пространстве изображений, состоит из собирающей и рассеивающей линз (рис. 3.4). В данной системе значение aberrаций достаточно велико, но aberrации от разных поверхностей линзы компенсируют друг друга.

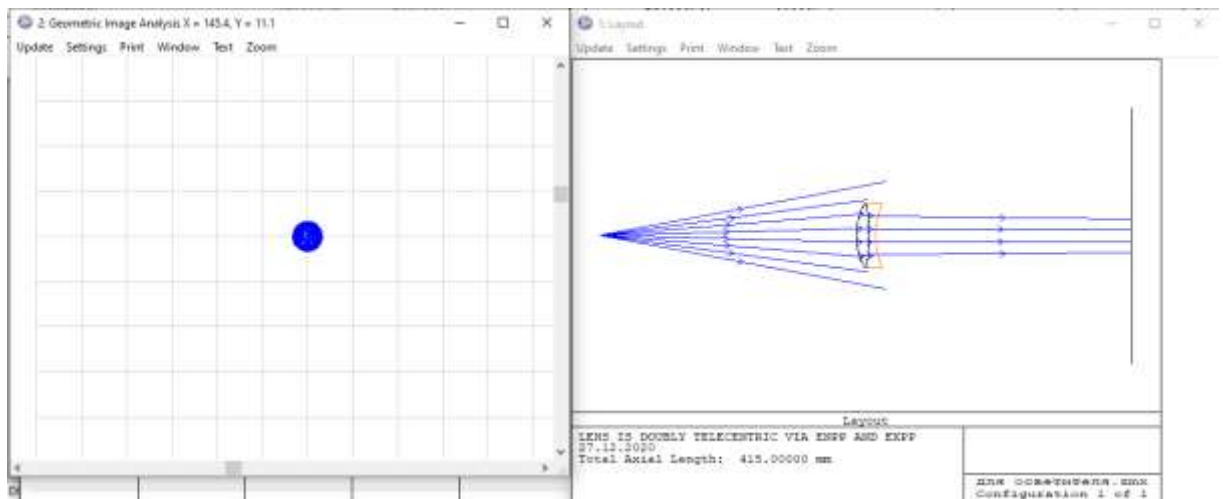


Рис.3.1. Общий вид оптической системы и геометрический анализ в пространстве изображений.

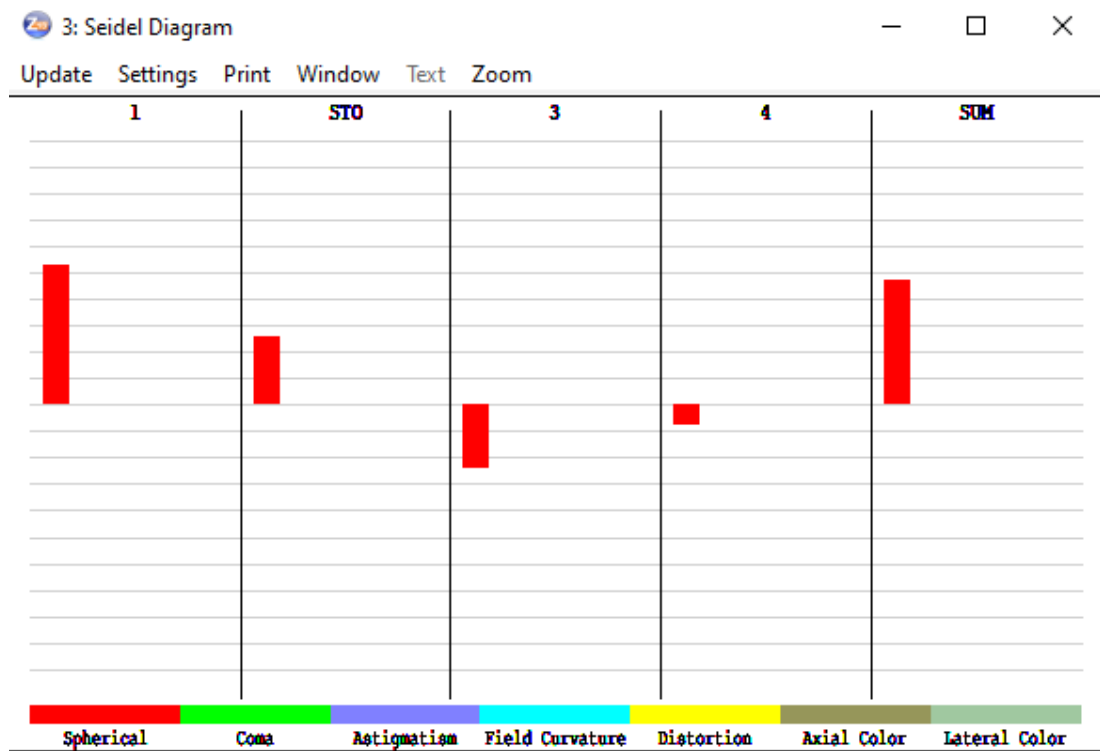


Рис.3.2. Аберрации системы на основе склеенного объектива.

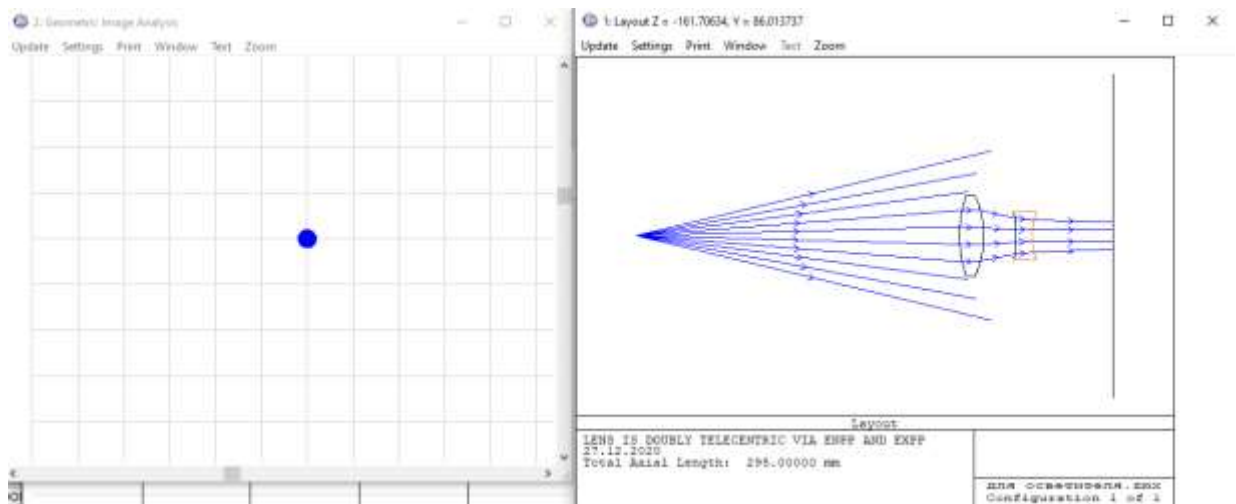


Рис. 3.3. Общий вид оптической системы и геометрический анализ в пространстве изображений.

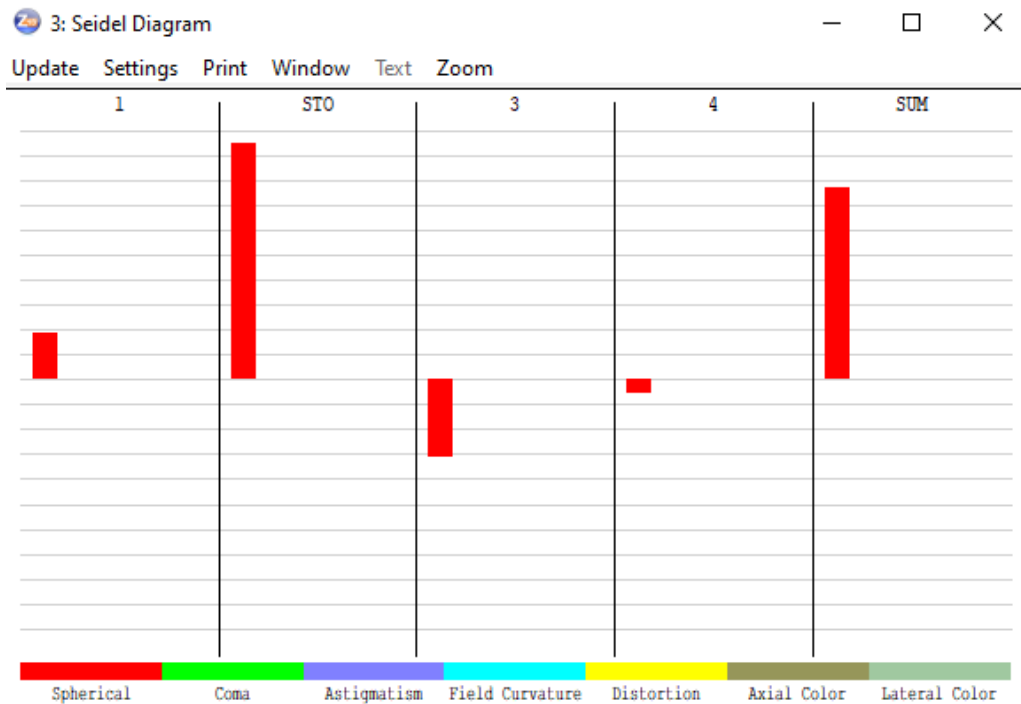


Рис 3.4. Аберрации системы, телецентрической в пространстве изображений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе решена оптотехническая задача обеспечения возможности спектральных измерений на нулевом эллипсометре ЛЭФ-2. Для этого вместо штатного экрана установлен селективный фотоприемник – акустооптический спектрометр «Кварц», работающий в спектральном диапазоне 400-820 нм. Спектрометр соединялся с эллипсометром через специальный переходник и волоконно-оптический кабель. Гашение проводилось на компьютере по графику интенсивности света, поступающего на ФЭУ спектрометра.

Одна из важнейших задач, которая появилась после модернизации эллипсометра, определение точности измерений, также успешно решена. Проведена юстировка эллипсометра ЛЭФ-2, позволившая с высокой точностью (на уровне 1') определить нулевые положения анализатора, поляризатора и компенсатора.

Проведены тестовые многоугловые измерения образцов поверхности кварцевого стекла, тонких пленок термического оксида и поливинилового спирта на кремниевых подложках. Достигнута высокая точность измерения эллипсометрических параметров ψ и Δ (погрешность не более 2'). Показатели преломления образцов, рассчитанные для разных углов падения, отличались не более, чем на 0,002. Полученные результаты по точности измерений можно считать предельными, которые в принципе можно достичь методом эллипсометрии.

Таким образом, получена эллипсометрическая система, обладающая высокой точностью измерений, близкой к предельной. Эта система имеет перспективы развития за счет установки источников белого света и оптических элементов, формирующих параллельный пучок света.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ржанов А.В., Свиташев К.К., Семенов А.И., Семенов Л.В., Соколов В.К. Основы эллипсометрии. Новосибирск, «Наука», 1978. 424 с.
2. Швец В.А., Спесивцев Е.В., Рыхлицкий С.В., Михайлов Н.Н. Эллипсометрия – прецизионный метод контроля тонкопленочных структур с субнанометровым разрешением // Российские нанотехнологии. 2009. Т. 4. № 3–4. С. 72–84.
3. Handbook of Ellipsometry. Edited by: Harland G. Tompkins and Eugene A. Irene. William Andrew Inc., 2005, 886 p.
4. Пшеницын В.И., Абаев М.И., Лызлов Н.Ю. Эллипсометрия в физико-химических исследованиях, Л.: Химия. 1986. 152 с.
5. Галуза А.А., Галуза А.И., Кудленко А.Д., Слатин К.А., Смирнов М.М. Универсальная система автоматизации эксперимента. // Радиоэлектроника и информатика. 2004. №1. С 66-69.
6. Ауиров В.М., Gritsenko V.A., Wong H., Kim C.W. Accurate Ellipsometric Measurement of Refractive Index and Thickness of Ultrathin Oxide Film // J. The Electrochem. Soc. 2006. V 153 (12). P 277-282.
7. Хасанов Т. Аттестация и средства контроля эллипсометров // Автометрия. 1997 №1. С. 81-94.
8. ИФП СО РАН [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.isp.nsc.ru/razrabotki/oborudovanie>. – Дата доступа: 15.02.2021.
9. Thinlayers [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://thinlayers.ru/index.php?ID=page2>. – Дата доступа: 11.02.2021.
10. Nanotech [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nanotech.ru/pages/about/elf.htm>. – Дата доступа: 09.02.2021.
11. Film Sense [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://film-sense.com/film-sense-multi-wavelength-ellipsometer/>. – Дата доступа: 16.02.2021.

- 12.Акашев Л.А., Попов Н.А., Шевченко В.Г. Оптические свойства гадолиния в конденсированном состоянии// Теплофизика высоких температур. 2019. Т.57. №1. С.55-60.
- 13.Киселев А.И., Шевченко В.Г., Попов Н.А. Теплота адсорбции кислорода на поверхности алюминия при комнатной температуре // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2019. Т.59. №2. С.153-157.
- 14.Макара В.А., Одарич В.А., Кепич Т.Ю., Преображенская Т.Д., Руденко О.В. Прибор и методы измерения параметров и степени однородности пленочных структур // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2009. №3. С .40-46.
- 15.Мунчик Г.Ф., Габидулин М.А., Жуковский В.А., Лейбович И.Д, Сальников Л.А. Автоматический спектральных эллипсометр на базе цифрового датчика угла. // Эллипсометрия: теория, методы, приложения. Новосибирск: Наука. 1987.
- 16.Бобро В.В., Дронь Н.И., Семенов А.И. Эллипсометр, сочетающий в себе «нулевой» и фотометрический подходы. // Научное приборостроение. 2000. Т. 10. №2. С. 59-62.
- 17.Иоффе Б.В. Рефрактометрические методы химии. Л.: ГХИ. 1960, 384 с.
18. Callard S., Gagnaire A., Joseph J. Characterization of graded refractive index silicon oxynitride thin films by spectroscopic ellipsometry // Thin Solid Films. 1998. V. 313-314. P. 384-388.
- 19.Li W.J., Song Z.R., Yu Y.H., Wang X., Zou S.C., Shen D.S. sp^3/sp^2 ratio in amorphous-carbon thin film by spectroscopic ellipsometry // J. Appl. Phys. 2003. V. 94. P. 284-287.
- 20.Ghong T.H., Kim T.J., Kim Y.D., Aspnes D.E. Spectroscopic ellipsometric analysis of interfaces: Comparison of alloy and effective-medium-approximation approaches to a CdMgTe multilayer system // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 85. P. 946-948.
- 21.Haage T., Schmidt U.I., Schroder D., Oechsner H. Modelling the dielectric function of thin films measured by spectroscopic ellipsometry: determination

- of microstructure and density // Fresenius J. Anal. Chem. 1995. V 353. P. 556-558.
22. Spaeth K., Kraus G., Gauglitz G. In-situ characterization of thin polymer films for applications in chemical sensing of volatile organic compounds by spectroscopic ellipsometry // Fresenius J. Anal. Chem. 1997. V. 357. P. 292-296.
23. Langereis E., Heil S. B. S., van de Sanden M.C.M., Kessels W.M.M. In-situ spectroscopic ellipsometry study on the growth of ultrathin TiN films by plasma-assisted atomic layer deposition // J. Appl. Phys. 2006. V. 100. P. 023534-1-9.
24. Aspnes D.E., Studna A.A. Dielectric functions and optical parameters of Si, Ge, GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, and InSb from 1.5 to 6.0 eV // Phys Rev. B. 1983. V. 27. P. 985-1009.
25. Easwarakhanthan T., Beyssen D., Le Brizoual L., Alnot P. Forouhi-Bloomer and Tauc-Lorentz optical dispersions applied using spectroscopic ellipsometry to plasma-deposited fluorocarbon films // J. Appl. Phys. 2007. V. 101. P. 073101-1-7.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ТЕХНИКА ПРОТИВОПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Правила пожарной безопасности для учреждений, организаций и предприятий Академии наук СССР (ППБО-105-87) утверждены распоряжением Президиума Академии наук СССР от 29 октября 1987 г. N 10143-1711

Правила разработаны на основании действующих "Типовых правил пожарной безопасности для ПРОМЫШЛЕННЫХ предприятий", утвержденных Главным управлением пожарной охраны МВД СССР 21 августа 1975 г., а также в соответствии с требованиями ГОСТа 12.1.004-85* "Пожарная безопасность. Общие требования".

Согласованы с Главным управлением пожарной охраны МВД СССР (письмо от 10.09.1987 г. N 7/1/2/93) и с Президиумом ЦК профсоюза работников просвещения, высшей школы и научных учреждений (постановление от 15 июля 1987 г. N 6).

Обязанности рабочих и служащих:

1. Каждый работающий в лаборатории, на складе, в административном помещении или на любом другом производственном участке (независимо от занимаемой должности) обязан четко знать и строго выполнять установленные правила пожарной безопасности, не допускать действий, которые могут привести к взрыву и пожару.

2. Все научные сотрудники, ИТР, рабочие и служащие должны проходить противопожарную подготовку с целью изучения правил пожарной безопасности, приемов использования имеющихся в учреждении средств пожаротушения и порядка действий при пожаре.

Противопожарная подготовка сотрудников включает противопожарные инструктажи и занятия по пожарно-техническому минимуму.

3. В случае обнаружения пожара или загорания каждый сотрудник обязан:

- немедленно сообщить об этом в пожарную охрану;

- принять меры к эвакуации людей;
- обесточить при необходимости приборы и оборудование, отключить вентиляцию;
- приступить к тушению очага пожара имеющимися в лаборатории, цехе, на складе или на рабочем месте средствами пожаротушения (огнетушитель, внутренний пожарный кран, стационарная установка пожаротушения и т.п.);
- принять меры по вызову к месту пожара руководителя подразделения.

4. Лица, виновные в нарушении настоящих Правил, в зависимости от характера нарушений и их последствий несут ответственность в дисциплинарном, административном или уголовном порядке.

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ С ЭЛЛИПСОМЕТРАМИ

Требования техники безопасности при работе на настроенном ЛЭФ-2:

- к выполнению работ допускаются лица, прошедшие обучение по технике безопасности и специальный инструктаж по правилам безопасности, электробезопасности и пожарной безопасности, усвоившие правильные и безопасные методы работы.
- при включённом питании нельзя вскрывать блок электроники.
- не допускать работы при снятых боковых панелях установки во избежание контакта с прямым или рассеянным лазерным пучком, что является травмоопасным;
- в случае обнаружения неисправности, отключить оборудование и поставить в известность специалистов. Не допускать самостоятельного ремонта оборудования.