

На правах рукописи



**Цепулин Владимир Германович**

**ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКИЙ  
МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИН МНОГОСЛОЙНЫХ  
ПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР**

Специальность 05.11.07 —  
«Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы»

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Москва — 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» на кафедре лазерных и оптико-электронных систем

Научный руководитель: **Карасик Валерий Ефимович**  
доктор технических наук, профессор

Официальные  
оппоненты: **Командин Геннадий Анатольевич**  
доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник  
Института общей физики имени А. М. Прохорова  
Российской академии наук

**Минаев Владимир Леонидович,**  
кандидат технических наук,  
начальник лаборатории Всероссийского научно-  
исследовательского института оптико-физических  
измерений

Ведущая организация: Акционерное общество «Государственный оптический институт имени С.И. Вавилова»

Защита состоится «05» июня 2019 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.19 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью организации, просьба направлять по адресу: г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1, учёному секретарю диссертационного совета Д 212.141.19.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 201\_ г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 212.141.19,  
кандидат физико-математических наук



Д.А. Семеренко

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## Введение

**Актуальность работы.** Технологии создания пленочных покрытий и структур являются ключевыми при производстве микросхем, солнечных батарей, диэлектрических зеркал, оптических фильтров и другой продукции. Характеристики этих устройств в значительной степени зависят от параметров наносимых пленочных структур, поэтому при контроле качества изготовления продукции необходимо осуществлять их измерение. Для этого широко применяются оптические методы и системы, реализующие эти методы, которые позволяют проводить бесконтактные, неразрушающие и высокоточные измерения толщин и оптических постоянных отдельных слоев таких покрытий.

Исследованиями в области измерения параметров слоев пленочных структур занимаются группы ученых из МГУ имени М.В. Ломоносова, Max Planck Institute of Quantum Optics, Лаборатории эллисометрии полупроводниковых материалов и структур института физики полупроводников СО РАН, National Research Council of Canada, Korea Institute of Science and Technology, The University of Electro-Communications (Japan). В результате исследований, проведенных этими и другими коллективами, были созданы системы, которые обеспечивают точность измерения толщин слоев, достигающую долей процентов. Это позволяет применять их как в целях непрерывного контроля процесса формирования пленочных структур, так и для итогового измерения толщин и оптических постоянных их слоев.

В большинстве известных систем реализуются измерения в одной точке поверхности, поскольку они предназначены, в первую очередь, для измерения пленочных структур с постоянными толщинами слоев по всей поверхности. Однако, точечных измерений не достаточно, когда толщины слоев меняются в зависимости от точки поверхности. Такие структуры широко используются в микрооптоэлектромеханических системах, а также ряде других устройств. При контроле изготовления этих устройств необходимо измерять распределение толщин по всей поверхности исследуемого объекта. Это требует либо поточечного измерения толщин слоев объекта совместно с его механическим перемещением, либо регистрации набора изображений поверхности образца. Для измерения распределения толщин структуры с удовлетворительным разрешением необходимо определять ее толщины в сотнях точек покрытия, поэтому оба подхода характеризуются значительной продолжительностью проводимых измерений.

Типичная продолжительность измерения толщин в одной точке объекта в известных системах (изготавливаемых такими компаниями, как Filmetrics, J.A. Woollam, Semilab, StellarNet, Ellipso Technology, Horiba, Angstrom Sun Technologies) находится в диапазоне от 0,05 до 1 с. Это не позволяет проводить измерения распределений толщин пленочных структур в реальном масштабе времени, и поэтому ограничивает процесс контроля качества изготовления продукции, содержащей пленочные покрытия сложной формы. В связи с этим

разработка метода, обеспечивающего высокоскоростное измерение толщин многослойных пленочных структур представляется важной задачей, что и определяет актуальность темы диссертационной работы.

**Целью диссертационной работы** являлась разработка высокоскоростного спектрофотометрического метода измерения распределения толщин многослойных пленочных структур.

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие **научно-технические задачи**:

- проведен анализ существующих методов измерения толщин многослойных пленок, на основе результатов которого обосновано использование спектрофотометрического метода и предложена структурная схема высокоскоростной спектрофотометрической установки, обеспечивающей малое время регистрации информации, необходимой для измерения;
- проведена модификация спектрофотометрического метода измерения толщин многослойных пленочных структур с целью уменьшения продолжительности измерения за счет использования априорной информации о материалах и порядке следования слоев структуры;
- исследованы зависимости продолжительности измерения толщин слоев пленочных структур от параметров разработанного метода и выявлены диапазоны оптимальных значений этих параметров;
- выполнен анализ погрешностей измерения толщин слоев пленочных структур и получены выражения для оценки случайной составляющей погрешности;
- разработана экспериментальная установка для проверки полученных в работе теоретических результатов.

**Объектом исследования** являются оптические методы определения геометрических параметров многослойных пленочных структур. В качестве **предмета исследования** выбран спектрофотометрический метод измерения толщин многослойных пленочных структур.

**Методы исследования.** При решении поставленных задач использовались методы физической и геометрической оптики, теории оптических систем, цифровой обработки сигналов и численные методы оптимизации.

- Научная новизна** полученных в работе результатов заключается в том, что:
- научно обоснован модифицированный спектрофотометрический метод измерения толщин многослойных пленочных структур, позволяющий в несколько раз уменьшить время измерений за счет использования априорной информации о материалах и порядке следования слоев этих пленочных структур;
  - установлено, что древовидная структура данных в виде R-дерева, созданная на основе априорных данных об измеряемой пленочной структуре, позволяет сократить область поиска минимального значения функции невязки;
  - использование двойного акустооптического монохроматора в измерительном канале спектрофотометра позволяет снизить время перестроения его рабочей длины волны до 25 мкс.

### **Положения, выносимые на защиту:**

- продолжительность измерения толщин слоев пленочной структуры уменьшается в несколько раз за счет использования априорной информации о материалах и порядке следования этих слоев, если их количество меньше четырех;
- использование в измерительном канале спектрофотометра двойного акусто-оптического монохроматора обеспечивает регистрацию до 1000 изображений исследуемого образца в секунду;
- применение древовидных структур данных в процедуре поиска толщин многослойных пленочных структур позволяет существенно сократить область поиска и тем самым ускорить процесс нахождения искомого решения.

### **Практическая значимость работы:**

- разработанный высокоскоростной метод измерения толщин многослойных пленок может быть использован для измерения распределения толщин слоев многослойных пленочных структур в реальном масштабе времени;
- применение спроектированной аппаратуры для высокоскоростной регистрации изображений пленочных структур позволяет обеспечить контроль качества изготовления микрооптоэлектромеханических устройств.

**Достоверность** выводов диссертационной работы обеспечивается согласованностью теоретических положений и результатов экспериментальных исследований.

**Апробация работы.** VIII международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика - 2013», (Санкт-Петербург, 2013); III всероссийской конференции по фотонике и информационной оптике, (Москва, 2014); XIII международной научно-практической конференции «Инженерные и научные приложения на базе технологий NI», (Москва, 2014); научно-технической конференции молодых учёных и специалистов «Актуальные вопросы развития систем и средств ВКО», (Москва, 2015).

**Внедрение и использование результатов работы.** Основные результаты диссертационной работы использованы в Miru Systems Co., Ltd, а также в образовательном процессе МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Научные исследования, проведенные в рамках диссертационной работы, поддержаны грантом Российского фонда фундаментальных исследований, проект №14-08-01103.

**Публикация результатов.** Основные результаты диссертационной работы изложены в 10 научных работах, в том числе в 3 научных статьях, опубликованных в журналах, входящих в Перечень ВАК РФ, 1 из них - в международную базу Scopus, а также в патенте № RU 2627966.

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, трех глав и общих выводов, изложенных на 167 страницах машинописного текста, содержит 68 рисунков, 12 таблиц и список литературы из 99 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость. Приведены структура диссертации, формы апробации и реализации результатов.

**В первой главе** проведен анализ известных оптических методов измерения толщин тонких пленочных структур, в результате которого выявлены их основные характеристики, позволяющие выбрать один из известных методов как наиболее подходящий для реализации высокоскоростной измерительной аппаратуры. Для измерения толщин слоев пленочных структур применяются три известных оптических метода: спектрофотометрия, эллисометрия и низкокогерентная интерферометрия. Во всех трех методах продолжительность измерения определялась временными затратами, необходимыми для регистрации параметров излучения, отраженного от объекта, и на обработку полученных сигналов. Результаты анализа известных методов, проведенного в работе, позволяют сделать вывод, что наименьшая длительность измерения (до 5 мкс на длину волны) может быть получена с использованием спектрофотометрических систем. К их преимуществам также относится меньшая чувствительность к вибрациям по сравнению с остальными методами и возможность реализации многоканальных систем, обеспечивающих одновременную регистрацию изображений на нескольких длинах волн излучения, что способствует уменьшению продолжительности измерения.



Рисунок 1. Структурная схема аппаратуры для измерения распределения толщин слоев пленочных структур

Время измерения спектрофотометрической системы, обобщенная структурная схема которой представлена на Рисунке 1, ограничивается двумя узлами: блоком спектральной селекции и блоком приемника излучения. Для достижения высокого быстродействия в системе используется матричный приемник излучения, на котором формируется изображение поверхности объекта, что позволяет регистрировать распределение коэффициента отражения объекта по всей его поверхности. Для спектральной селекции излучения может быть использован один из двух перспективных перестраиваемых оптических фильтров, позволяющих осуществлять передачу изображения: акустооптический или жидкокристаллический.

В ходе проведенного анализа и сопоставления их характеристик в работе показано, что акустооптический фильтр является более перспективным для реализации измерительной установки, поскольку обеспечивает минимальное время перестроения длины волны 25 мкс, что на несколько порядков меньше

по сравнению с жидкокристаллическим фильтром. Это является основным преимуществом акустооптического фильтра. Также он обладает относительно высоким коэффициентом пропускания и малой шириной спектральной полосы пропускания, за счет чего он позволяет в несколько раз снизить время экспонирования (при одинаковых условиях засветки объекта) и уменьшить погрешности измерения коэффициента отражения.

Продолжительность измерения складывается из времени перестройки рабочей длины волны измерительной установки и длительности регистрации кадров, которая определяется в составе используемой системы. Известно, что скорость передачи данных современных видеокamer позволяет осуществлять регистрацию нескольких тысяч кадров за секунду. Таким образом, при использовании передовых фильтров и высокоскоростных видеокamer, суммарное время перестроения рабочей длины и регистрации кадра не превышает 1 мс. Следовательно система, построенная на базе этих устройств, позволяет регистрировать более тысячи спектральных изображений образца в секунду, что является достаточным для реализации измерений в реальном масштабе времени.

На базе двойного акустооптического монохроматора и высокоскоростной видеокamer в диссертации разработана структурная схема измерительной установки, иллюстрация оптического канала которой приведена на Рисунке 2. В ней излучение от источника проходит через осветительную оптическую систему, отражается от полупрозрачного зеркала, и проходит через микрообъектив, в результате чего формируется подсветка исследуемого объекта. Отраженное от объекта излучение вновь проходит через микрообъектив, формирующий на выходе параллельные пучки лучей. После прохождения через акустооптический фильтр из излучения выделяется составляющая на рабочей длине волны. Затем излучение фокусируется тубусным объективом на матричном приемнике

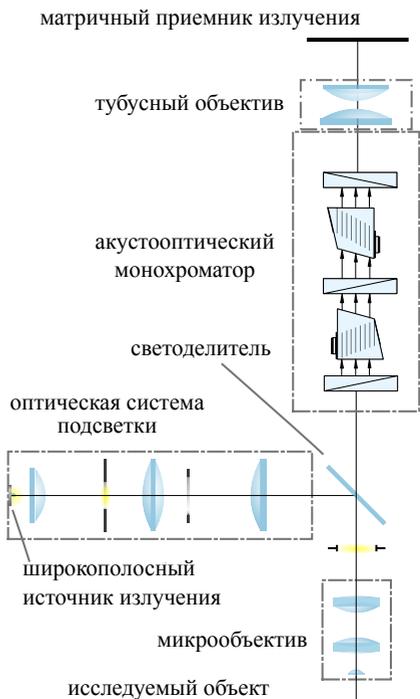


Рисунок 2. Схема оптического канала спектрофотометрической установки

излучения. Для представленной схемы в диссертации разработана методика габаритного расчета.

Изображения, получаемые с использованием измерительной установки, содержат информацию о распределении коэффициента отражения пленочной структуры. Уровень дискретного сигнала, соответствующий пикселю матричного приемника излучения, может быть преобразован в величину усредненного коэффициента отражения объекта в области, оптически сопряженной с этим пикселем. Однако, для осуществления такого преобразования необходимо провести калибровку измерительной установки. Если в ней используется матричный приемник излучения с линейной вольтовой энергетической характеристикой, коэффициент отражения может быть вычислен согласно выражению:

$$\rho_{x,y}(\lambda) = \frac{U_{i,j}(\lambda) - U_{i,j}^0(\lambda)}{\alpha_{i,j}(\lambda)},$$

где  $\lambda$  – длина волны,  $i$  и  $j$  – целочисленные координаты пикселя в плоскости матричного приемника излучения,  $U_{i,j}$  – уровень сигнала, соответствующий этому пикселю,  $U_{i,j}^0$  – уровень сигнала, формируемый темновым потоком,  $\alpha_{i,j}$  – коэффициент наклона линейной зависимости выходного сигнала от коэффициента отражения,  $\rho_{x,y}$  – усредненный коэффициент отражения в области, оптически сопряженной с указанным пикселем. Величины  $U_{i,j}^0$  и  $\alpha_{i,j}$  могут быть определены для каждого пикселя в результате калибровки, методика которой разработана в диссертации.

Калибровка включает в себя регистрацию двух изображений на каждой из рабочих длин волн: изображение объекта с эталонным коэффициентом отражения и изображение, содержащее распределение темнового сигнала  $U_{i,j}^0$ . Второе изображение регистрируется в условиях отсутствия объекта и отведения излучения в сторону от микрообъектива. Это позволяет выделить составляющую излучения подсветки, попадающую на приемник после переотражения от оптических деталей внутри оптической системы установки. Зарегистрированные изображения используются для расчета коэффициентов  $\alpha_{i,j}$  для каждого пикселя приемника излучения. Предложенная методика позволяет учесть и компенсировать разброс чувствительностей элементов МПИ, неравномерность освещенности объекта и спектральные характеристики пропускания компонентов по полю зрения оптической системы.

В результате исследований, изложенных первой главе, разработана структурная схема спектрофотометрической измерительной установки, обеспечивающая высокоскоростную регистрацию распределения коэффициентов отражения пленочной структуры. Однако, для обеспечения малой продолжительности измерения необходимо также достичь высокой скорости обработки зарегистрированной информации. С этой целью **во второй главе** разрабатывается метод измерения толщин многослойных пленочных структур, быстрдействие которого достигается за счет использования априорной

информации о материалах, порядке следования и диапазонах толщин слоев пленочной структуры.

Определение толщин слоев пленочной структуры по набору измерений коэффициентов отражения представляет из себя задачу поиска параметров сложной нелинейной функции по набору ее измеренных значений. Для поиска неизвестных параметров вводится функция невязки:

$$\eta(\mathbf{d}) = \sum_{i=1}^N [\rho_{t,\lambda_i}(\lambda_i, \mathbf{d}) - \rho_{m,\lambda_i}(\lambda_i)]^2,$$

где  $\mathbf{d} = \{d_1, \dots, d_L\}$  – вектор толщин слоев пленочной структуры,  $\lambda = \{\lambda_1, \dots, \lambda_N\}$  – набор рабочих длин волн,  $\rho_t$  – значение коэффициента отражения, рассчитанное теоретически,  $\rho_m$  – измеренное значение коэффициента отражения. Функция невязки, по существу, представляет из себя меру отличия коэффициентов отражения, рассчитанных с использованием математической модели от измеренных на различных длинах волн. Неизвестные толщины слоев выбираются таким образом, чтобы эта функция принимала наименьшее значение в области допустимых параметров. В этом случае набор выбранных толщин пленочной структуры соответствует глобальному минимуму функции невязки. Его поиск затрудняется наличием большого количества локальных экстремумов функции невязки, поэтому для вычисления набора толщин структуры задают начальное приближение. Однако, если толщины слоев значительно изменяются по поверхности структуры, такое начальное приближение не известно. В таком случае необходимо использовать методы глобальной оптимизации.

Методы глобальной оптимизации требуют проведения большого объема вычислений, и, как следствие, значительных временных затрат. Для определения длительности обработки спектрофотометрических измерений с использованием методов глобальной оптимизации в диссертации были выполнены вычислительные эксперименты, в ходе которых проводилось математическое моделирование отражения излучения пленочной структурой. В результате моделирования были вычислены наборы коэффициентов отражения для различных наборов толщин, многократно выбранных случайным образом из допустимых диапазонов. Рассчитанные коэффициенты отражения использовались для определения длительности поиска решения методами глобальной оптимизации. Для определения минимума функции невязки, введенной в процессе поиска решения, был применен метод дифференциальной эволюции, который в научных работах характеризуется высокой скоростью сходимости к глобальному минимуму. Замеры времени, необходимого для осуществления проведенных вычислений показали, что суммарная продолжительность операций, выполняемых в процессе обработки спектрофотометрических измерений, позволяет определять толщины в среднем в 15 точках пленочной структуры за одну секунду. Однако для восстановления формы пленочной структуры в реальном масштабе времени требуется обеспечить не менее 100 измерений в секунду. То есть длительность обработки

спектрофотометрических измерений не позволяет достичь требуемого быстродействия.

Для преодоления этого ограничения в диссертационной работе предложен путь к уменьшению объема вычислений, основанный на использовании априорных сведений о количестве, порядке следования и материалах слоев измеряемой пленочной структуры, а также диапазонах их допустимых толщин. С использованием этой информации на этапе предшествующем измерению – этапе инициализации – выполняется расчет наборов коэффициентов отражения для различных толщин из области их допустимых значений. Рассчитанная информация сохраняется и используется на этапе обработки измерений, что позволяет локализовать множество толщин, в котором расположено искомое решение. Сужение области поиска решения позволяет исключить значительную часть ресурсоемких вычислений, в результате чего достигается существенное уменьшение продолжительности обработки измерений.

После регистрации набора коэффициентов отражения многослойной пленки из всего множества предварительно рассчитанных наборов коэффициентов отражения выбираются такие, которые расположены вблизи измеренного. В силу непрерывности функции зависимости коэффициента отражения от толщины слоев пленки, она принимает близкие значения для близкорасположенных значений аргументов. Поэтому для всех наборов толщин слоев, соответствующих выбранному набору коэффициентов отражения, функция невязки будет мала. Среди этих наборов толщин будут и такие, которые расположены вблизи искомого глобального минимума. Для таких толщин ближайший локальный минимум функции невязки будет являться глобальным. То есть наличие предварительно рассчитанного массива коэффициентов позволяет существенно сократить область поиска глобального минимума функции невязки и использовать для его поиска методы локальной оптимизации вместо ресурсоемких методов глобальной оптимизации.

Чтобы обеспечить малое время поиска наборов коэффициентов отражения близких к измеренным на каждой из рабочих длин волн, необходимо упорядочить рассчитанные значения и осуществлять их хранение в специальной структуре данных, позволяющей осуществлять эффективный поиск среди хранимой многомерной информации. Для решения этой задачи разработаны древовидные структуры данных, в которых элементы хранятся иерархически. Специальная организация данных позволяет рекурсивно сокращать область поиска элемента при просмотре хранимых данных, за счет чего обеспечивается высокое быстродействие. Известны две структуры данных, предназначенных для хранения и осуществления эффективного поиска по многомерным данным: К-мерное дерево и R-дерево. Первое используется для хранения многомерной точечной информации, а второе - для хранения областей конечного объема. R-дерево, как показано в работе, обеспечивает меньшую продолжительность определения области толщин пленочной структуры, в которой располагается

решение и поэтому наилучшим образом подходит для хранения информации о значениях коэффициентов отражения.

В процессе формирования древовидной структуры данных все множество допустимых толщин слоев разбивается на отдельные подмножества  $D_p$ ,  $p = 1 \dots P$ . Разбиение предлагается проводить таким образом, чтобы подмножества представляли из себя области, ограниченные гиперпрямоугольниками, размерность которых равна количеству слоев пленки. Из соображений простоты упорядочивания и хранения областей толщин все стороны гиперпрямоугольников принимаются равными. Иллюстрация такого разбиения приведена для двух рабочих длин волн на Рисунке 3. Для каждой области толщин  $D_p$  определяются минимальные и максимальные коэффициенты отражения на рабочих длинах волн, выбранных заранее. Для этого посредством метода Бройдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно решаются оптимизационные задачи:

$$\rho_{i,\max} = \max_{\mathbf{d} \in D_p} \rho(\mathbf{d}, \lambda_i), \quad i = 1 \dots N, \quad (1)$$

$$\rho_{i,\min} = \min_{\mathbf{d} \in D_p} \rho(\mathbf{d}, \lambda_i), \quad i = 1 \dots N. \quad (2)$$

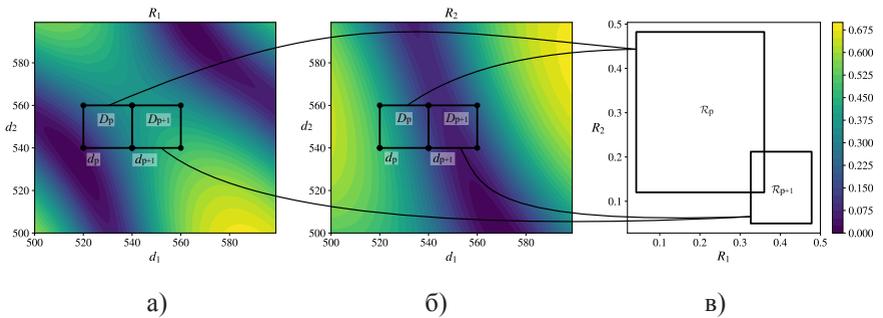


Рисунок 3. Иллюстрация построения интервалов коэффициентов отражения для случая двух базовых длин волн: а), б) параметрические изображения распределения коэффициента отражения пленочной структуры в зависимости от толщин ее слоев в) изображения интервалов коэффициентов отражения

Особенности функции зависимости коэффициента отражения от толщин, выявленные в диссертационной работе, позволяют осуществить выбор размера области таким образом, чтобы внутри этой области находилось не более одного локального экстремума. Выполнение этого условия гарантирует правильность определения интервалов изменения коэффициента отражения выбранным методом локальной минимизации.

Поскольку длительность поиска по такому дереву зависит от размерности хранимых данных, то для формирования R-дерева выбирается  $M$  длин волн из числа рабочих, названных базовыми. Полученные пары минимальных и максимальных значений коэффициента отражения на этих длинах волн образуют  $M$ -мерный гиперпрямоугольник (см. Рисунок 3, в). Он ограничивает область в

пространстве коэффициентов отражения, в которую попадают все значения, соответствующие множеству  $D_p$ . Рассчитанный гиперпрямоугольник добавляется в массив исходных данных для построения R-дерева.

По окончании вычисления границ интервалов весь массив полученных данных упорядочивается в виде R-дерева с применением алгоритма STR, который за счет специальной компоновки данных позволяет снизить длительность поиска. Полученная таким образом структура данных, хранящая информацию об интервалах изменения функции коэффициента отражения, используется в процессе измерения.

После регистрации коэффициентов отражения с использованием спектрофотометрической установки по сформированной базе данных выполняется поиск с целью локализации областей малых значений функции невязки. В ходе такого поиска из хранимых многомерных прямоугольников выбираются такие, которые пересекаются с гиперпрямоугольником  $\rho_m$  с центром в точке  $\rho_m$ , заданной измеренным набором коэффициентов отражения в  $M$ -мерном пространстве. Длина сторон этого многомерного прямоугольника по каждой координате равна удвоенной величине максимальной погрешности измерения коэффициента отражения на соответствующей длине волны. В диссертации показано, что при таком размере сторон, многомерный прямоугольник  $\rho_q$ , соответствующий области толщин, в которой располагается искомое решение, будет пересекать прямоугольник  $R_m$ , а точка  $\rho_t$ , соответствующая измеряемому набору толщин, будет принадлежать области пересечения этих прямоугольников (см. Рисунок 4).

Условия поиска и принципы формирования структуры данных гарантируют, что искомое решение будет принадлежать области, ограниченной одним из найденных многомерных прямоугольников. В пределах каждой области толщин, которая соответствует найденной области коэффициентов отражения, с использованием метода Левенберга-Марквардта выполняется поиск локального минимума функции невязки. Набор толщин, соответствующий наименьшему минимуму среди найденных, является искомым решением.

Перед проведением расчетов на этапе инициализации выбирается как число базовых длин волн  $M$ , так и размер шага разбиения по толщинам слоев пленочной структуры. Эти параметры могут оказывать значительное влияние на длительность обработки измерений. В связи с этим в диссертационной работе была поставлена задача по исследованию этого влияния и определению значений, при которых достигается наибольшее быстродействие. В рамках

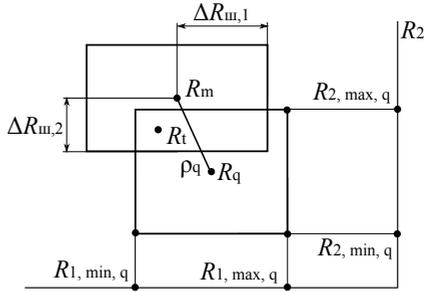


Рисунок 4. Иллюстрация расположения точки  $\rho_t$  относительно многомерных прямоугольников  $\rho_m$  и  $\rho_q$

проведенных расчетов задавалась априорно известная информация о пленочной структуре, на основании которой производилось формирование R-дерева. Далее полученная структура данных использовалась для вычисления толщин слоев пленочной структуры по коэффициентам отражения заданной структуры вычисленных в результате математического моделирования отражения излучения пленочной структурой, толщины слоев которой случайно выбирались из допустимого диапазона.

В результате проведенных исследований были получены зависимости длительностей обработки измерений от перечисленных выше параметров. На Рисунке 5 приведены зависимости продолжительности поиска решения от величины шага разбиения, полученных на примере двухслойной пленочной структуры  $\text{TiO}_2 - \text{SiO}_2$ , нанесенной на подложку из кремния, и для различных допустимых толщин слоев от 50 нм до  $d_{\max}$ . Из представленных графиков видно, что для шага по толщине не более 12 нм быстродействие практически не зависит от размера области допустимых толщин слоев. При таком размере шага обеспечивается пространственное разделение полученных интервалов коэффициентов отражения, что позволяет осуществить от 2000 до 3000 измерений в секунду. При размерах шага разбиения, превышающих 12 нм, с увеличением размера области допустимых толщин увеличивается количество интервалов, найденных с использованием R-дерева, и, как следствие, возрастают временные затраты на поиск решения в пределах интервалов, выделенных с использованием методов локальной минимизации. Как видно из рисунка, во всех представленных зависимостях присутствует область оптимальных значений шага разбиения (от 3 до 8 нм), в которой продолжительность обработки мала и почти не зависит от величины диапазонов допустимых толщин. Указанный диапазон является оптимальным и для пленочных структур, содержащих слои из других материалов, поскольку характер зависимости продолжительности обработки от величин  $\Delta d_i$  для фиксированного числа слоев и заданных диапазонов толщин остается неизменным.

С целью выявления областей значений количества базовых длин волн, при которых достигается максимальное быстродействие, были проведены вычислительные эксперименты в ходе которых измерялась длительность операции поиска по R-дереву. В результате проведенных исследований установлено, что по мере увеличения количества базовых длин волн уменьшается перекрытие

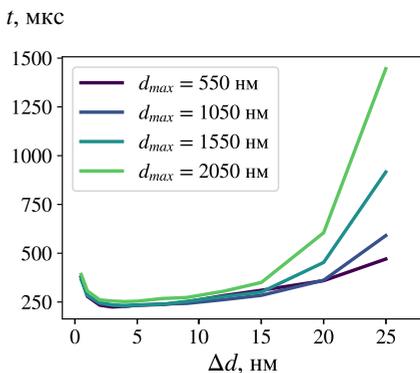


Рисунок 5. Зависимость длительности обработки от периода разбиения по толщинам слоев

интервалов коэффициентов отражения. За счет чего уменьшается среднее количество областей толщин, в пределах которых выполняется поиск решения и, как следствие, временные затраты на вычисления, проводимые в рамках локальной оптимизации функции невязки. При достижении оптимального количества базовых длин волн, равного 5 или 6, в результате поиска определяется несколько областей толщин и дальнейшее увеличение базовых длин волн не приводит к лучшему пространственному разделению, сокращению области поиска решения и увеличению быстродействия. При этом увеличиваются временные затраты на операцию поиска по R-дереву.

В результате проведенного исследования погрешностей измерения были получены выражения, позволяющие оценить случайную погрешность измерения. При выводе этих выражений была произведена замена функции зависимости коэффициента отражения от толщин слоев пленок на ее линейное приближение, что позволило получить выражение для расчета среднеквадратического отклонения погрешности измерения толщин:

$$\sigma_{d_j} = \sigma_\rho \sqrt{(\mathbf{P}^T \mathbf{P})_{j,j}^{-1}}, \quad (3)$$

где  $\sigma_\rho$  – среднеквадратическое отклонения измерения коэффициентов отражения,  $\mathbf{P}$  – матрица размером  $N$  на  $L$ . Ее элементы представляют из себя частные производные функции коэффициента отражения  $P_{i,j} = \left. \frac{\partial \rho_i}{\partial d_j} \right|_{\lambda=\lambda_i, \mathbf{d}=\hat{\mathbf{d}}}$ , где  $\hat{\mathbf{d}}$  – вектор измеренных толщин. В случае, когда значение  $\sigma_R$  не известно, оно может быть оценено с использованием выражения:

$$\sigma_{d_j} = \sqrt{\frac{\eta(\hat{\mathbf{d}}) \cdot (\mathbf{P}^T \mathbf{P})_{j,j}^{-1}}{N - L}}. \quad (4)$$

Выражения (3) и (4) позволяют оценить случайные погрешности измерения толщин многослойных пленок для различных количества и значений рабочих длин волн. Так среднеквадратичное отклонение погрешности измерения толщины однослойной пленки на 50 рабочих длинах волн и при среднеквадратическом отклонении аддитивной помехи, равном 0,5% от уровня сигнала, составит от 0,2 до 0,4 нм, а на 10 длинах волн – от 0,5 до 0,7 нм.

С целью проверки устойчивости разработанного метода к случайным аддитивным шумам были реализованы вычислительные эксперименты, в ходе которых проводилось математическое моделирование отражения излучения пленочными структурами с различными случайно выбранными в пределах допустимых значений толщинами слоев. К вычисленным коэффициентам отражения были добавлены случайные шумы, распределенные по нормальному закону. Полученные в результате суммирования коэффициенты отражения использовались для определения толщин пленочной структуры разработанным методом и последующего определения ошибки найденного решения. Вывод о достоверности найденного решения осуществлялся на основании сопоставления

ее величины с ожидаемым значением. Вычислительные эксперименты, выполненные по описанной схеме многократно для различных величин гауссовского шума, позволили установить, что метод является устойчивым к помехе со среднеквадратическим отклонением, не превышающим 0,8 %.

**В третьей главе** приводятся результаты экспериментальных исследований, проведенных на опытном образце установки для измерения распределения толщин слоев многослойных пленочных структур. Представленные исследования направлены на верификацию основных теоретических результатов, полученных в диссертационной работе. Для этого на базе разработанной в первой главе структурной и оптических схем спектрофотометрической измерительной установки была собрана и отъюстирована экспериментальная установка (см. Рисунок 6).

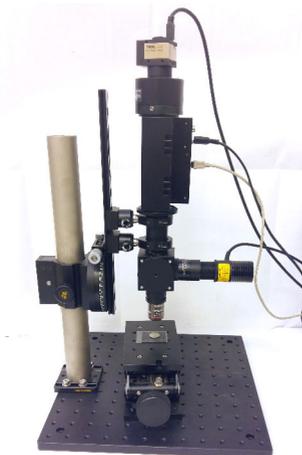


Рисунок 6. Фотография экспериментальной установки для измерения толщин пленочных структур

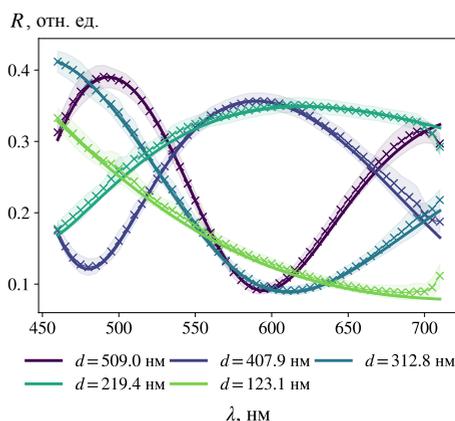


Рисунок 7. Теоретическая (—) и экспериментальная (x) зависимости коэффициента отражения от длины волны излучения

В экспериментальной установке используются видеочамера DCC1240M, позволяющая регистрировать до 98 изображений в секунду, монохроматор АВМ-1 на базе двойного акустооптического фильтра с длительностью перестроения рабочей блины волны менее 2 мс, а также микрообъектив Olympus Plan N с увеличением 4. Изображение, регистрируемое видеочамерой, передается в персональный компьютер, на котором с использованием разработанного программного обеспечения осуществляется обработка и выводятся ее результаты.

Собранная экспериментальная установка позволила провести эксперименты, направленные, во-первых, на проверку корректности измерений коэффициента отражения, регистрируемых с использованием спектрофотометрической аппаратуры, а, во-вторых, на подтверждение высокого быстродействия разработанной модификации спектрофотометрического метода.

В ходе верификации методики калибровки было проведено сопоставление экспериментальных спектров коэффициента отражения различных зон эталонного объекта с теоретическими. Эталон представляет из себя кремниевую подложку с нанесенным на нее слоем  $\text{SiO}_2$ , толщина которого постоянна в пределах каждой из шести зон эталона. Первая зона эталона, толщина покрытия в которой составляет 0,6 нм, была использована для калибровки установки, а остальные - для проверки результатов калибровки. Измерения спектрального коэффициента отражения в этих зонах образца представлены на графике 7. На этом же графике приводятся значения коэффициента отражения, рассчитанные теоретически. Близкое соответствие полученных графиков свидетельствует о достоверности проводимых измерений.

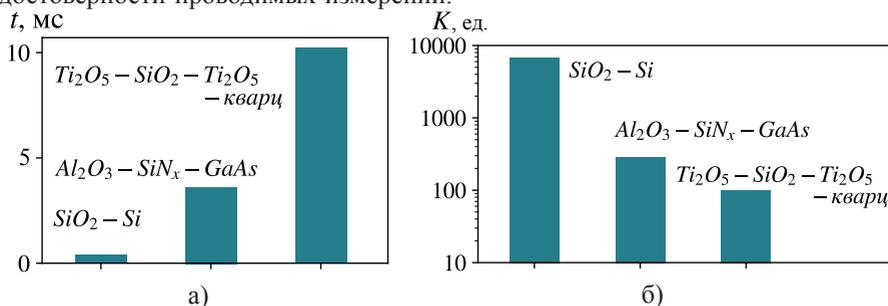


Рисунок 8. Результаты экспериментальных измерений пленочных структур с различным количеством слоев: а) зависимость длительности восстановления толщин слоев пленки в единичной точке поверхности от количества слоев; б) зависимость числа точек поверхности, восстанавливаемых за секунду, от количества слоев

С целью исследования быстродействия разработанного метода в работе была проведена серия экспериментов, включающих измерения однослойного покрытия  $\text{SiO}_2$ , нанесенного на кремниевую подложку, двухслойного  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiN}_x$ , нанесенного на подложку из  $\text{GaAs}$ , и трехслойного  $\text{Ti}_2\text{O}_5 - \text{SiO}_2 - \text{Ti}_2\text{O}_5$ , нанесенного на кварцевую подложку. В результате экспериментов было установлено, что длительность регистрации спектральных изображений исследуемых образцов ограничивается быстродействием видеокамеры, установленной в экспериментальную установку, и составляет 40 мс на одну рабочую длину волны в случае работы в полнокадровом режиме и 10 мс – при работе в высокоскоростном режиме. Быстродействие системы может быть увеличено при условии использования видеокамеры с большей кадровой частотой.

В процессе измерения распределения толщин также проводились замеры времени обработки зарегистрированных изображений. Полученные результаты, представленные на Рисунке 8, позволяют сделать вывод, что длительность обработки в значительной степени зависит от количества слоев пленочной структуры. Длительности измерения распределения толщин слоев пленочной структуры в пересчете не единичную точку поверхности, достигнутые в проведенном

эксперименте по измерению многослойных пленок покрытий, подтверждают высокое быстродействие разработанной в диссертации модификации спектрофотометрического метода.

Для проверки полученных в диссертации выражений для оценки погрешности была проведена серия измерений толщин зон эталонного объекта с использованием 50 длин волн равномерно расположенных в диапазоне от 460 до 700 нм. В рамках проведенного эксперимента теоретические выражения были использованы для оценки ожидаемой случайной погрешности измерения. Рассчитанные значения среднеквадратических отклонений измерения были сопоставлены со значениями, полученными в результате обработки измерений эталона.

В результате обработки результатов экспериментов были вычислены погрешности измерения, которые представлены на Рисунке 9 в виде графика зависимости погрешности от толщины слоя. На графике также отложены значения, оцененные с использованием полученного во второй главе выражения (4). Среднее отличие оценочных значений погрешности от экспериментальных составило 20 %, что подтверждает достоверность полученных выражений.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

В результате выполненных исследований был решен комплекс научных и инженерных задач, направленных на разработку методов и аппаратуры для высокоскоростного измерения распределения толщин слоев пленочных структур, как диэлектрических, так и слабопоглощающих. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- Разработан модифицированный спектрофотометрический метод измерения толщин слоев многослойных диэлектрических пленочных структур, малая длительность измерения в котором (от 0,16 до 4 мс) обеспечивается использованием априорной информации о материалах слоев пленок. Разработанный метод позволяет в несколько раз уменьшить продолжительность измерения пленочных покрытий, содержащих менее 4 слоев.
- Разработанная структурная схема спектрофотометрической установки для измерения толщин слоев, обеспечивает регистрацию до 1000 изображений

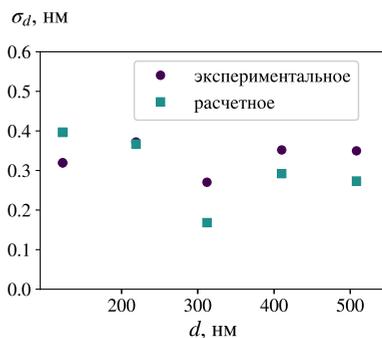


Рисунок 9. Зависимости среднеквадратического отклонения погрешности измерения толщины объекта, рассчитанные теоретически и полученные в результате обработки экспериментальных данных

объекта в секунду за счет использования высокоскоростного двойного акустооптического монохроматора.

- Проведен анализ алгоритмов поиска в признаковом пространстве коэффициентов отражения пленочной структуры, в результате которого установлено, что наиболее высокоскоростная обработка измерений реализуется при условии использования структуры данных в виде R-дерева для хранения информации о спектральных коэффициентах отражения пленочной структуры, рассчитанной на основе априорных данных для соответствующего диапазона толщин слоев пленки.
- Предложена методика калибровки системы измерения распределения толщин многослойных пленочных покрытий по образцу с эталонной отражающей характеристикой, которая позволяет до 6 раз уменьшить погрешность измерения толщины, за счет компенсации влияния неравномерности освещенности объекта и разброса чувствительностей элементов матричного приемника излучения, а также учета спектрального пропускания оптических компонентов, входящих в состав измерительной системы.
- Разработана и изготовлена экспериментальная установка, на которой проведены измерения, подтверждающие полученные теоретические результаты. Установка позволяет проводить измерение толщин слоев пленочной структуры в диапазоне от 50 до 1200 нм с погрешностью 2 – 5 %.
- Получены выражения для расчета случайной погрешности измерения толщин слоев пленочных структур, экспериментальная проверка которых показала, что среднее расхождение значений погрешностей, рассчитанных с использованием этих выражений и погрешностей, полученных экспериментально, составляет 20 %.

**Основные результаты диссертации изложены в следующих работах:**

1. Оценка погрешностей измерения толщин многослойных пленочных покрытий методом спектральной рефлектометрии / В. Цепулин [и др.] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2017. № 3 (114). С. 4–12. (0,56 пл./0,5 пл.)
2. Измерение распределения толщин многослойных пленочных структур методами спектральной рефлектометрии / В. Цепулин [и др.] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2016. № 3 (108). С. 3–12. (0,63 пл./0,55 пл.)
3. Thin film thickness measurement error reduction by wavelength selection in spectrophotometry / V.G. Tsepulin [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2015. Vol. 584. P. 012011. (0,44 пл./0,38 пл.)
4. Метод измерения распределения толщин ИТО-покрытий с помощью акустооптического видеоспектрометра / Цепулин В.Г. [и др.] // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. Вып. 9. № 3–4. URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/915.html> (дата обращения: 14.01.2019) (0,5 пл./0,2 пл.)

*Цепулин Владимир Германович*

Высокоскоростной спектрофотометрический метод измерения толщин многослойных пленочных структур

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук

Подписано в печать \_\_\_\_\_.\_\_\_\_.\_\_\_\_\_. Заказ № \_\_\_\_\_

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография \_\_\_\_\_

