

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

*На правах рукописи*

**Новикова Юлиана Александровна**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ КОНСТАНТ ПЛЕНОК ФТОРИДОВ  
В СРЕДНЕЙ ИК ОБЛАСТИ СПЕКТРА И СИНТЕЗ НА ИХ ОСНОВЕ  
АХРОМАТИЧЕСКИХ ПРОСВЕТЛЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ**

Специальность: 01.04.05 – Оптика

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени кандидата

физико-математических наук

**Научный руководитель:**

д.ф. – м.н., профессор

Е.Н. Котликов

Санкт-Петербург – 2015

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ЧАСТЬ 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ КОНСТАНТ ПЛЕНОК ФТОРИДОВ	10
ГЛАВА 1. СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ КОНСТАНТ	12
1.1. Обзор спектрофотометрических методов исследования оптических констант пленок	12
1.2. Анализ пленок и интерференционных покрытий	16
1.2.1. Математическая модель	17
1.2.2. Рекуррентный метод	20
1.2.3. Адмиттансный метод	21
1.2.4. Матричный метод	22
1.3. Методика определения показателя преломления непоглощающих пленок	28
1.4. Расчет спектров пропускания и отражения при наличии поглощения	32
1.5. Методика определения оптических констант пленок при наличии поглощения	34
1.6. Программное обеспечение методики	41
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ КОНСТАНТ ПЛЕНОК	44
2.1. Изготовление пленок	44
2.2. Оптические константы подложек	45
2.3. Оптические константы пленок на основе фторида бария	50
2.4. Оптические константы пленок на основе фторида иттрия	56
2.5. Сводные результаты по оптическим константам	62
Заключение	68
ЧАСТЬ 2. СИНТЕЗ АХРОМАТИЧЕСКИХ	

ПРОСВЕТЛЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ	70
ГЛАВА 3. МЕТОДЫ СИНТЕЗА	
ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ	72
3.1. Обзор методов синтеза интерференционных покрытий	72
3.1.1. Аналитические методы синтеза	72
3.1.2. Численные методы оптимизации характеристик покрытия	76
3.2. Метод эквивалентных слоев	86
3.3. Программное обеспечение синтеза покрытий	91
ГЛАВА 4. АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ	
СИНТЕЗИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ	96
4.1. Обзор методов анализа устойчивости	96
4.2. Критерий устойчивости на основе анализа трансформации спектров	100
4.3. Программное обеспечение для анализа устойчивости	102
4.4. Сравнительный анализ критериев устойчивости интерференционных покрытий	105
4.4.1. Полосовой интерференционный фильтр	105
4.4.2. Ахроматическое просветляющее покрытие	110
4.4.3. Светоделительное покрытие	112
ГЛАВА 5. АХРОМАТИЧЕСКИЕ ПРОСВЕТЛЯЮЩИЕ	
ПОКРЫТИЯ ДЛЯ СРЕДНЕЙ ИК ОБЛАСТИ СПЕКТРА	118
5.1. Методика синтеза просветляющих покрытий	119
5.2. Просветляющие покрытия на кремнии	121
5.3. Просветляющие покрытия на германии	129
5.4. Просветляющие покрытия на селениде цинка	135
Заключение	140
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ	142
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	144

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Научно-технический прогресс в оптическом приборостроении активизировал развитие в области оптики и спектроскопии пленок и интерференционных покрытий. И наоборот, фундаментальные исследования в области физики тонких пленок позволили создать принципиально новые типы систем оптоэлектроники.

Основными параметрами, определяющими оптические свойства пленок, являются дисперсия показателя преломления и поглощения. Для определения параметров оптических пленок разработаны и успешно применяются на практике спектрофотометрические методы, в основу которых положен анализ спектров пленок и покрытий. Этой задаче в настоящее время уделяется большое внимание. Основные трудности при ее реализации связаны с неоднозначностью анализа спектрофотометрических спектров, в особенности при исследовании пленок, обладающих дополнительными полосами поглощения, отсутствующими в монокристаллах.

Развитие оптического приборостроения невозможно без создания новейших интерференционных покрытий. Для их синтеза требуются прозрачные оптические пленки с набором различных показателей преломления и минимальным поглощением в требуемом спектральном диапазоне. Основными критериями качества пленочных материалов являются: прозрачность, показатель преломления, однородность, плотность, адгезия, твердость, механические напряжения, устойчивость к воздействию окружающей среды. В настоящее время не существует универсальных материалов, обладающих всеми вышеперечисленными свойствами. Их поиску и созданию также уделяется большое внимание.

Перед современной физической оптикой стоит ряд проблем, которые необходимо учитывать при выборе направлений дальнейшего развития теории синтеза интерференционных покрытий и возможности их практической

реализации. Одна из основных задач – создание оптических покрытий с требуемыми спектральными характеристиками, устойчивыми к ошибкам в оптических параметрах слоев, неизбежными в процессе изготовления.

Введены различные критерии устойчивости и рассмотрена возможность их применения. В настоящее время эта задача также не имеет однозначного решения.

В данной работе рассмотрены оригинальные спектрофотометрические методы определения оптических констант пленок. Они базируются на исключении из спектров пропускания и отражения поглощения пленок. Эти методы позволили впервые наблюдать дополнительные дисперсионные зависимости пленок при наличии в них полос поглощения, отсутствующих в монокристаллах. Предлагаются и исследуются новые оптические материалы на основе фторидов в средней ИК области спектра. Предложен критерий устойчивости синтезированных покрытий и проведен сравнительный анализ с другими критериями. С использованием введенного критерия устойчивости синтезирован и реализован ряд ахроматических просветляющих покрытий в средней ИК области спектра.

Таким образом, актуальность работы определяется: разработкой оригинальных методов определения оптических констант пленок; исследованием пленок фторидов; поиском новых пленкообразующих материалов; решением задачи устойчивости синтеза покрытий; синтезом с использованием вышеперечисленных задач ахроматических просветляющих покрытий.

**Цель работы:** исследование оптических констант пленок фторидов и их применение для создания ахроматических просветляющих покрытий.

В данной работе **объектом исследования** являются оптические свойства пленок и тонкопленочные покрытия, а **предметом исследования** – методы нахождения оптических констант пленок, в том числе пленок фторидов и бифторидов, а также проектирование и изготовление ахроматических просветляющих покрытий.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие **основные задачи**:

1. Предложить и разработать метод исследования дисперсионных зависимостей оптических констант пленок при наличии сильных полос поглощения.
2. Исследовать дисперсионные зависимости оптических констант пленок  $\text{BaF}_2$ ,  $\text{YF}_3$ ,  $\text{CaF}_2$ .
3. Исследовать оптические константы и свойства новых пленкообразующих материалов на основе бифторидов иттрия, бария, кальция, магния для средней ИК области спектра.
4. Предложить и разработать методику коррекции интерференционных покрытий в процессе синтеза и изготовления.
5. Разработать методику синтеза ахроматических просветляющих покрытий.
6. Синтезировать ахроматические просветляющие покрытия с использованием исследуемых пленок на подложках из Si, Ge, ZnSe.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Предложена методика определения оптических констант пленок, базирующаяся на коррекции спектров и исключении поглощения в них.
2. Исследованы дисперсионные зависимости оптических констант пленок  $\text{BaF}_2$ ,  $\text{YF}_3$ ,  $\text{CaF}_2$  в среднем ИК диапазоне.
3. Предложены и исследованы двойные фториды  $\text{Ba}_x\text{Me}_{1-x}\text{F}_2$ ,  $\text{Y}_x\text{Me}_{1-x}\text{F}_{2+x}$  в среднем ИК диапазоне.
4. Разработано программное обеспечение для определения оптических констант.
5. Предложена методика, в основе которой лежит введенный критерий устойчивости синтезированных интерференционных покрытий.
6. Создано программное обеспечение для анализа устойчивости интерференционных покрытий.
7. Модернизировано программное обеспечение Film Manager, которое позволяет проводить замену начальной конструкции эквивалентной

структурой, типа HLH или LHL (H – высокопреломляющий слой, L – низкопреломляющий слой).

### **Практическая значимость полученных результатов**

1. Получение и исследование оптических свойств фторидов и новых пленкообразующих материалов:  $BaF_2$ - $MgF_2$ ,  $BaF_2$ - $CaF_2$ ,  $YF_3$ - $BaF_2$  в средней ИК области спектра.
2. Создание программного обеспечения для определения оптических констант пленок в средней ИК области спектра.
3. Составление базы данных по оптическим константам тонких пленок, которая позволяет учесть вызываемые ошибки в расчетах синтезируемых покрытий.
4. Разработка методов анализа коррекции синтезированных покрытий в процессе их изготовления.
5. Синтез, изготовление и исследование просветляющих покрытий для средней ИК области спектра.
6. Использование результатов работы при выполнении ряда НИР, проводимых в Санкт-Петербургском государственном университете аэрокосмического приборостроения.
7. Использование результатов работы на предприятиях ОАО НИИ «Гириконд», ОАО «Тидекс».
8. Использование результатов при чтении спецкурсов по направлению «Оптехника» в Санкт-Петербургском государственном университете аэрокосмического приборостроения.

**Достоверность результатов** обеспечивается их согласием с результатами теоретических и экспериментальных исследований, использованием аттестованных методик и аппаратных средств измерений.

На защиту выносятся следующие **научные положения**:

1. Метод определения ОК пленок по спектрам пропускания и отражения в средней ИК области спектра при наличии сильных полос поглощения.

2. Результаты экспериментальных исследований по наблюдению дополнительной дисперсии оптических констант пленок в областях поглощения, отсутствующих в монокристаллах.
3. Результаты исследования влияния легирующих добавок на оптические характеристики пленок  $\text{BaF}_2$  и  $\text{YF}_3$  в средней ИК области спектра.
4. Результаты данных по оптическим константам пленкообразующих веществ на основе фторидов и бифторидов.
5. Методика анализа устойчивости интерференционных покрытий и программное обеспечение для нее, в основе которой лежит введенный критерий устойчивости.
6. Синтез, изготовление и исследование широкополосных просветляющих покрытий для подложек из  $\text{ZnSe}$ ,  $\text{Si}$ ,  $\text{Ge}$  в средней ИК области спектра.

**Реализация результатов работы.** Материалы работы использованы при чтении спецкурсов «Прикладная оптика», «Оптика лазеров», «Проектирование интерференционных покрытий», «Оптические измерения тонких пленок», «Технология изготовления тонких пленок», читаемых по направлению «Оптотехника» на кафедре физики Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. А также при выполнении ряда НИР, проводимых в Санкт-Петербургском Государственном университете аэрокосмического приборостроения и на предприятиях ОАО НИИ «Гириконд», ОАО «Тидекс».

**Апробация результатов работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: научная сессия ГУАП, Санкт-Петербург 7-11 апреля 2014; VIII Международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика-2013», ИТМО, Санкт-Петербург 14-18 октября 2013; научная сессия ГУАП, Санкт-Петербург 8-13 апреля 2013; II Всероссийская конференция по фотонике и информационной оптике. М.: НИЯ МИФИ, 23-25 января 2013; 15th International Conference «Laser Optics 2012», SPb, June 25-29, 2012; VII Международная конференция

«Фундаментальные проблемы оптики – 2012», ИТМО, Санкт-Петербург 15-19 октября 2012; научная сессия ГУАП, Санкт-Петербург 9-13 апреля 2012; VII Международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика-2011», ИТМО, Санкт-Петербург 17-21 октября 2011; научная сессия ГУАП, Санкт-Петербург 9-13 апреля 2011; научная сессия ГУАП, Санкт-Петербург 9-13 апреля 2010

**Публикации.** В диссертации обобщены результаты 19 работ автора, которые указаны в списке литературы. Четыре работы опубликованы в журналах из перечня ведущих периодических изданий ВАК.

**Личное участие автора.** В материалах совместных работ личный вклад автора является определяющим. Основная часть теоретических и экспериментальных исследований выполнена автором самостоятельно. Формулировка направлений и исследований, обсуждение и интерпретация результатов проводилась совместно с научным руководителем.

**Структура и объемы работы.** Диссертационная работа состоит из введения, двух частей, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 132 наименования. Основная часть работы изложена на 157 страницах машинописного текста. Работа содержит 51 рисунок и 18 таблиц.

# ЧАСТЬ 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ КОНСТАНТ ПЛЕНОК ФТОРИДОВ

## Введение

Основными параметрами, определяющими оптические свойства пленок, являются дисперсия показателя преломления и поглощения. Их исследованию уделяют большое внимание [1-8]. Для определения параметров оптических пленок разработано и успешно применяется на практике множество методик, в основу которых положен анализ различных физических величин. Наиболее часто измеряемыми величинами исследуемых образцов являются: направленное пропускание, зеркальное отражение, изменения фазы при прохождении и отражении света, фазовые изменения, вносимые образцом, для *S*- и *P*-поляризаций прошедшего и/или отраженного света и некоторые другие.

Благодаря универсальности и отсутствию необходимости создания специального измерительного оборудования наиболее широкое практическое применение получили методы, основанные на анализе данных спектрофотометрических измерений. Обзор публикаций, посвященных вопросам определения оптических констант тонких пленок, представлен, например, в работах [9-12].

В настоящей работе проводится синтез и исследование ахроматических просветляющих покрытий, для реализации которых требуются пленки с минимальными показателями преломления и поглощения. Одним из наиболее подходящих материалов с низким показателем преломления в средней ИК области спектра является фторид бария, обладающий низким ( $n=1.30 - 1.40$ ) показателем преломления. Недостатком фторида бария является его гигроскопичность и невысокая механическая прочность. Поэтому для улучшения оптических и механических характеристик пленок предлагается использовать соединения на основе бинарных фторидов. В работах [6-7] обсуждаются

возможности использования бифторидных соединений для получения пленкообразующих материалов с улучшенными оптическими и механическими свойствами.

В настоящей работе проводились исследования пленок одинарных фторидов  $\text{YF}_3$ ,  $\text{BaF}_2$ ,  $\text{CaF}_2$  и двойных фторидов (бифторидов)  $\text{Ba}_x\text{Me}_{1-x}\text{F}_2$ ,  $\text{Y}_x\text{Me}_{1-x}\text{F}_{2+x}$  в диапазоне 1.3-12 мкм. В качестве составляющей (Me) использованы фториды кальция, магния и бария. Для определения оптических констант использована оригинальная методика, базирующаяся на коррекции спектров и исключении поглощения в них. Пленки и монокристаллов фторидов  $\text{YF}_3$ ,  $\text{BaF}_2$ ,  $\text{CaF}_2$  давно используются в оптическом приборостроении и их основные параметры приведены в ряде работ [8, 13-17]. Однако в этих работах практически отсутствуют исследования дисперсионных констант этих пленок, это относится и к пленкам двойных фторидов. Ранее пленки  $\text{Ba}_x\text{Mg}_{1-x}\text{F}_2$  исследовались в работе [6] на длинах волн 0.9 и 10.6 мкм. Было показано, что такие пленки имеют больший показатель преломления и большую плотность упаковки, чем пленки из чистого фторида бария.

Для получения оптических констант пленок использовался спектрофотометрический метод, который базируется на предложенной методике коррекции спектров пропускания и отражении, т.е. на исключении поглощения в системе «пленка-подложка». Это позволяет использовать известные методики по определению оптических констант в системе «непоглощающая пленка — непоглощающая подложка» [18], а также различные оптимизационные методы.

## ГЛАВА 1. СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ КОНСТАНТ

### 1.1. Обзор спектрофотометрических методов исследования оптических констант пленок

В настоящее время существует ряд методов исследования оптических констант (ОК) пленок, перечислим некоторые из них:

- эллипсометрический (поляриметрический) метод [8, 19-22], в котором проводится наблюдение эллипса поляризации отраженного света и по параметрам его находятся искомые оптические величины;

- спектрофотометрический метод [17, 22-30], заключающийся в анализе спектров пропускания и отражения пленки на подложке с известными оптическими константами;

- калориметрический метод [31-33], позволяющий исследовать поглощение пленки посредством измерения временных зависимостей температуры образца, подвергаемого воздействию излучения (недостаток- поглощение может быть измерено только на одной длине волны);

- методы, основанные на измерении предельного угла полного внутреннего отражения (волноводный метод) [22, 34-35], заключающийся в том, что используется прохождение излучения вдоль пленки при полном внутреннем отражении излучения от ее границ;

- физоинтерферометрический метод [8, 22], позволяющий определить геометрическую толщину пленки и показатель преломления, основываясь на измерении смещения интерференционных полос, образующихся в тонком воздушном клине (полосы равной толщины).

Известно, что существует огромное количество разнообразных спектрофотометрических методов. Можно выделить методы, в которых используются только спектры отражения [27], только спектры пропускания [23-

25], совместно используются спектры отражения и пропускания [25] при нормальном падении света на систему «пленка-подложка», а также группу методов, в которых используется спектры отражения или пропускания при наклонном падении света [29-30]. Спектрофотометрические методы позволяют проводить исследования в широком спектральном диапазоне и не требуют создания оригинального измерительного оборудования.

С точки зрения используемых математических методов определения оптических констант (ОК) пленок можно разделить на два класса [36]: аналитические [18, 22, 26] и численные [6, 22-24, 27-28]. Первая группа методов предполагает поиск удобных аналитических выражений для прямого расчета оптических констант в различных частных случаях.

В частности, существует метод в основе которого лежит процедура построения плавных огибающих интерференционных максимумов и минимумов спектра пропускания пленки на плоскопараллельной прозрачной подложке с заведомо известной зависимостью  $n_{подл}(\lambda)$  и дальнейшем рассмотрении кривых  $T_{max}(\lambda)$  и  $T_{min}(\lambda)$  как непрерывных функций. В частности, такой подход был использован в работе [37] при исследовании оптических свойств пленок халькогенидов мышьяка различного состава. Более подробно метод рассмотрен в главе 1.3.

Примером другого подхода является работа [26], где спектр пропускания делится, в зависимости от величины поглощения, на области прозрачности, области слабого и сильного поглощения, и каждой области соответствует свое приближенное выражение для определения ОК.

Вторая группа базируется на различных численных методах. В качестве примера можно привести работу [38], где применяется метод минимизации функции качества для расчета ОК. В работах [22, 25] поиск вводится на основе решения системы нелинейных уравнений для энергетических коэффициентов отражения и пропускания системы «пленка-подложка» на длине волны  $\lambda$ :

$$\begin{cases} T_{\text{эксн}}(\lambda) - T_{\text{теор}}(n, k, d, \lambda) = 0 \\ R_{\text{эксн}}(\lambda) - R_{\text{теор}}(n, k, d, \lambda) = 0 \end{cases} \quad (1.1.1)$$

где  $n, k$  – показатели преломления, поглощения системы «пленка-подложка»,  $d$  – геометрическая толщина пленки,  $T(\lambda)_{\text{эксн}}$  и  $R(\lambda)_{\text{эксн}}$  – экспериментальные спектры, а  $T_{\text{теор}}(n, k, d, \lambda)$  и  $R_{\text{теор}}(n, k, d, \lambda)$  — теоретические (расчетные) значения энергетических коэффициентов отражения и пропускания системы «пленка-подложка» на длине волны  $\lambda$ . Они могут быть рассчитаны различными методами: матричным [39], рекуррентным [40] или адмиттансным [2]. Эта система может быть решена для некоторых частных случаев, как это описано в методе [22, 26]. Однако в этих работах не описаны приемы, позволяющие исключить толщину пленки из уравнений.

Для этого предварительно определяется геометрическая толщина пленки  $d_f$ , например, по положению экстремумов в спектре [18]. Далее, для каждого значения длины волны  $\lambda$  находится такая пара значений  $(n, k)$ , которая является решением системы (1.1.1). Одним из способов нахождения решения является итерационный метод Ньютона. Оптические константы тонких пленок некоторых веществ с использованием такого подхода исследованы, в работах [41,42].

Сложности принципиального характера при такой постановке задачи заключаются в том, что она является обратной задачей. Сложность решения этой задачи заключается в ряде моментов. Во-первых, для системы (1.1.1) существует множество решений. Во-вторых, система (1.1.1) является крайне неустойчива по отношению ко входным данным, т.е. к величинам  $T_{\text{эксн}}(\lambda)$  и  $R_{\text{эксн}}(\lambda)$ . Систематические и случайные ошибки, возникающие при измерении  $T_{\text{эксн}}(\lambda)$  и  $R_{\text{эксн}}(\lambda)$ , приводят либо к существенным изменениям решений  $(n, k)$ , либо к ситуации, когда система (1.1.1) вообще не имеет решения. Метод, в котором используются  $R(\lambda)_{\text{эксн}}$  и  $T(\lambda)_{\text{эксн}}$  называют  $T, R$  – методом [2,5]. Этот метод позволяет находить оптические константы (ОК) пленок во всем требуемом ИК диапазоне спектра.

Альтернативным подходом для решения обратной задачи может служить ее постановка в вариационном виде. В этом случае минимизации подвергается функция невязки, которая может быть записана, например, в среднеквадратичном виде:

$$Er(n, k, d, \lambda) = \frac{1}{2} \sqrt{\left| T_{\text{эксн}}(\lambda) - T_{\text{теор}}(n, k, d, \lambda) \right|^2 + \left| R_{\text{эксн}}(\lambda) - R_{\text{теор}}(n, k, d, \lambda) \right|^2}. \quad \text{Для}$$

каждого значения длины волны  $\lambda$  строится последовательность  $\bar{A}_1 \rightarrow \bar{A}_2 \rightarrow \bar{A}_3 \rightarrow \dots$ , доставляющая минимум функции ошибки  $Er(\bar{A}_1) > Er(\bar{A}_2) > Er(\bar{A}_3) > \dots$ , где  $\bar{A}_i$  – вектор с координатами  $\{n_i, k_i, d_i\}$ . Однако, в этом случае трудности при нахождении достоверного решения связаны с многоэкстремальностью функции  $Er(n, k, d)$ .

В общем случае нахождение оптических констант пленок спектрофотометрическим методом проводится по следующим этапам:

- выбор подложки и измерение спектров отражения и пропускания;
- определение ОК подложки;
- напыление пленки;
- измерение спектров отражения, пропускания и поглощения системы «пленка-подложка»;
- обработка экспериментальных спектров;
- расчет ОК пленки;
- анализ результатов расчета ОК пленки.

Итак, в нашей работе был выбран спектрофотометрический метод, который достаточно хорошо освещен в литературе. В этом методе измеряются спектры отражения и пропускания пленки на подложке.

Новым в методе является то, что мы дополнительно исключаем поглощение в системе «пленка-подложка».

## 1.2. Анализ пленок и интерференционных покрытий

Рассмотрим методы расчетов спектров пленок и покрытий. В физической оптике этот раздел обычно называют анализом.

В настоящее время теория расчета спектральных характеристик многослойных оптических покрытий и пленок базируется на основе электромагнитной теории [43]. Определение отражения  $R$ , пропускания  $T$  и поглощения  $A$  многослойного пленочного покрытия с точки зрения электромагнитной теории сводится к решению граничной задачи. Эта задача заключается в определении стационарных амплитуд векторов напряженности электрического и магнитного полей на границах многослойного покрытия при падении световой волны с определенными характеристиками. Все энергетические соотношения и фазовые изменения, в конечном счете, выражаются через векторы поля.

Данная теория хотя и не свободна от неопределенностей, но обеспечивает относительно полный и последовательный учет интерференционных и поляризационных эффектов в пленочных многослойных покрытиях всех типов. Среди фундаментальных характеристик вещества одно из основных мест принадлежит оптическим константам (постоянным) – показателю преломления  $n$  и показателю поглощения  $k$ . Эти величины, описывающие взаимодействие электромагнитного поля со средой, чутко реагируют на изменения ее состава и структуры. Показатели преломления и поглощения среды являются функциями частоты электромагнитного излучения, а в случае анизотропных сред  $n$  и  $k$  зависят и от направления распространения излучения. Ниже рассмотрим математическую модель.

### 1.2.1. Математическая модель

Для решения задачи анализа и синтеза интерференционных пленок и покрытий нами используется описанная ниже модель электромагнитного излучения среды и многослойного покрытия [2, 8, 39, 43-45].

Электромагнитное излучение (согласно фундаментальной работе Борна и Вольфа «Основы оптики» [39]), распространяющееся в среде, характеризуется амплитудой колебаний электрического  $E$  или магнитного  $H$  вектора напряженности поля излучения, частотой излучения, состоянием поляризации и направлением распространения, определяемым волновым вектором  $k$ . Относительно падающего на покрытие излучения делается предположение, что оно описывается плоской линейно-поляризованной монохроматической волной с фронтом бесконечной ширины. Уравнение плоской монохроматической волны в изотропной среде имеет вид:

$$E = E_0 \exp\{i\omega[t - Nkr/c]\} \quad (1.2.1)$$

где  $t$  – время,  $r$  – радиус-вектор,  $\omega$  – круговая частота,  $c$  – скорость света в вакууме,  $i$  – мнимая единица.

Величину  $N = n - ik$ , описывающую оптические свойства среды, называют комплексным показателем преломления. Его вещественная часть  $n$  – показатель преломления – равна отношению скоростей распространения света в вакууме и данной среде, а мнимая часть  $k$  – показатель экстинкции (поглощения) – характеризует уменьшение интенсивности излучения в среде в результате поглощения. Иногда комплексный показатель преломления записывают как  $N = n(1 - i\tilde{k})$ , и тогда величину  $\tilde{k}$  называют показателем затухания [39].

Интенсивность светового потока  $I$ , распространяющегося в среде, пропорциональна  $|E_0|^2$  и, согласно закону Бугера-Ламберта-Бэра, после прохождения слоя вещества толщиной  $d$  связана с начальным значением интенсивности  $I_0$  следующим образом:

$$I = I_0 \exp\{-\alpha d\} = I_0 \exp\{-4\pi k d / \lambda_0\} \quad (1.2.3)$$

где  $\lambda_0$  – длина волны излучения в вакууме,  $\alpha = 4\pi k / \lambda_0$  – натуральный показатель поглощения среды [46].

Величина  $A = (I_0 - I) / I_0$ , представляющая собой отношение потока излучения, поглощенного телом, к падающему на него потоку, называется поглощением.

На рис.1.2.1 схематически изображено многослойное пленочное покрытие, состоящее из  $m$  слоев, с обеих сторон к которым примыкают полубесконечные среды [4]. Слои пронумерованы сверху вниз в направлении распространения световой волны.

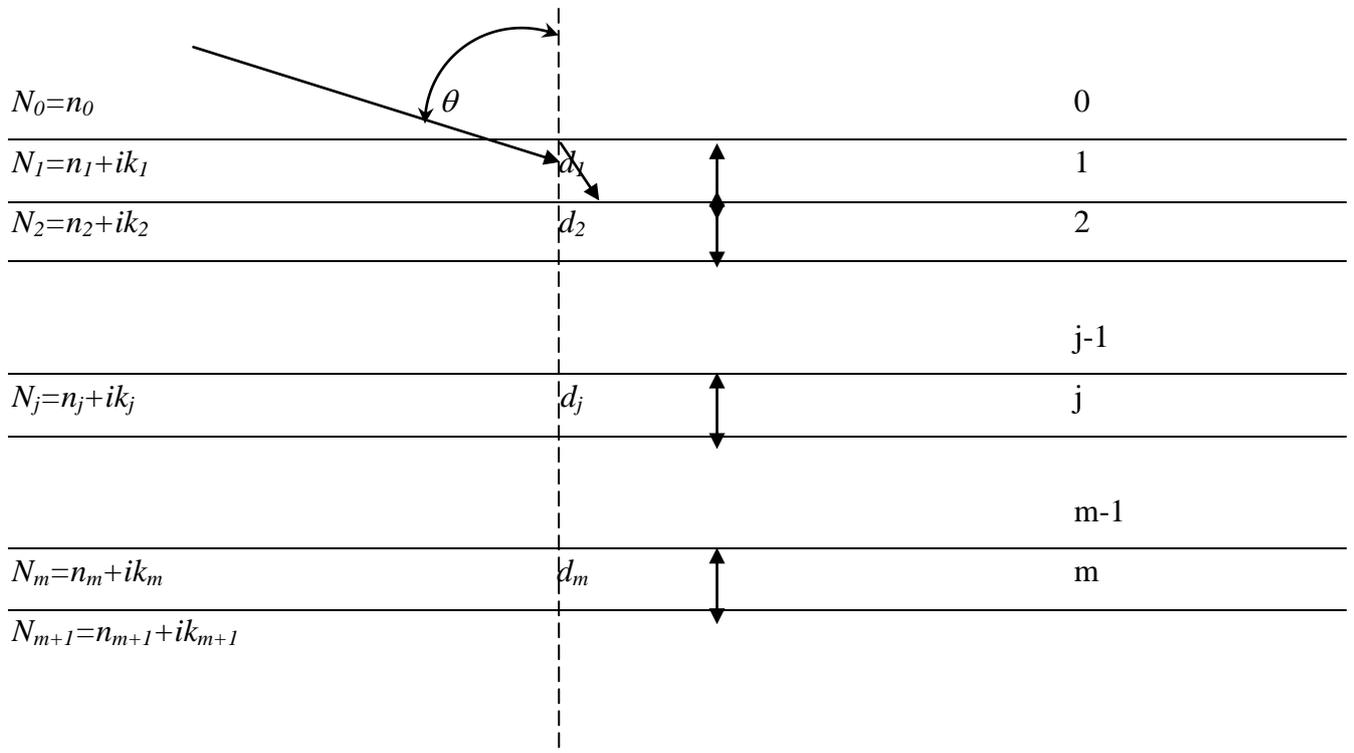
Математически многослойные оптические системы описываются системой, состоящей из конечного числа слоев с различными комплексными показателями преломления  $N_j = n_j - ik_j$  и толщинами  $d_j$ , сравнимыми с длиной световой волны. Здесь  $n_j$  показатель преломления, а  $k_j$  – показатель поглощения  $j$ -слоя. Величина  $k_j$  может быть равна нулю, если в слое нет поглощения.

Обычно в теории предполагают, что слои системы являются однородными, изотропными и имеют строго параллельные границы и бесконечную протяженность. Окаймляющие среды также считают однородными и изотропными. Точность вычислений зависит от точности описания данной моделью реального процесса распространения электромагнитного излучения в покрытии [43].

Предположение о бесконечной протяженности слоев в направлениях  $x$  и  $y$  с учетом ширины светового пучка исключает из рассмотрения дифракционные эффекты. Это предположение хорошо выполняется на практике, в частности, при фотометрических измерениях, когда поперечные размеры покрытия и падающего на него пучка велики по сравнению с длиной волны.

Было сделано допущение, что падающий свет описывается линейно поляризованной волной с фронтом бесконечной ширины (по сравнению с длиной волны). Из ряда работ [2, 47] следует, что это допущение требует уточнения

только при изготовлении очень узкополосных интерференционных фильтров или фильтров малых геометрических размеров.



**Рис.1.2.1.** Схема многослойной пленочной системы.

В модели (см. рис.1.2.1) есть ряд приближений, когда каждый отдельный слой является однородным и изотропным. Тогда оптические свойства полностью описываются комплексным показателем преломления  $N_j = n_j - ik_j$  ( $j = 1, 2, \dots, m+1$ ) и геометрической толщиной  $d_j$ .

Предположение о монохроматичности падающего излучения тоже не имеет ограничивающего характера при толщинах пленок сравнимых с длиной волны излучения, а изотропность оптических элементов слоев покрытия и окружающих сред хорошо выполняется на практике при использовании тонких пленок с аморфной и поликристаллической структурой [48].

На практике падающий свет не идеально монохроматичен и коллимирован, существуют небольшие локальные вариации толщины пленок и подложек. Подложка не всегда ведет себя как элемент многослойной системы, свойства которого зависят от длины волны. При решении некоторых математически более простых задач (анализа однослойных покрытий, а не синтеза многослойных ИП) можно учесть дисперсию ее показателя преломления, также влияние второй (задней) отражающей поверхности подложки на коэффициенты отражения и прозрачности многослойной системы [8, 43].

Эта математическая модель используется для описания многослойной системы различными методами. Наличие нескольких методов расчета свидетельствует о том, что одного универсального метода не существует. Кратко рассмотрим наиболее часто используемые методы: рекуррентный, адмиттансный, матричный.

### 1.2.2. Рекуррентный метод

Этот метод, предложенный Власовым [40] основан на учете многократных отражений и преломлений луча в слоях пленки с последующим суперпонированием этих лучей. Суперпонирование совершается путем суммирования амплитуд с учетом фазы каждого луча. Основными формулами в методе А.Г. Власова являются рекуррентные соотношения [40,44]:

$$r_{j-1,m+1} = \frac{r_{j-1,j} + r_{j,m+1}e^{-2i\Phi_j}}{1 + r_{j-1,j}r_{j,m+1}e^{-2i\Phi_j}}$$

$$t_{j-1,m+1} = \frac{t_{j-1,j}t_{j,m+1}e^{-i\Phi_j}}{1 + r_{j-1,j}r_{j,m+1}e^{-2i\Phi_j}},$$

где  $r_{jk}$  и  $t_{jk}$  – амплитудные коэффициенты отражения и пропускания для границы раздела  $j-1$  и  $j$  сред, определяемые известными формулами Френеля [39],  $\Phi_j$  – эффективная фазовая толщина  $j$ -ого слоя.

Рекуррентные формулы наиболее просто использовать при выполнении расчета распределения поля в одном или во всех слоях системы. Они обеспечивают необходимую точность, но не удобны для расчета интерференции в поглощающих слоях, так как число необходимых уравнений быстро растет с числом слоев (например, для расчета отражения света от поверхности с 3-слойной пленкой составляется 5 уравнений, с 11-слойной – 21 уравнение и т.д.) [2,4,8].

### 1.2.3. Адмиттансный метод

Иногда для расчетов спектральных характеристик применяется вычислительная схема, основанная на использовании адмиттанса [2].

Оптический адмиттанс  $Y(z,k)$  представляет собой величину, обратную импедансу. Импеданс  $Z(z,k)$  вводится соотношением:

$$Z(z,k) = 1/Y(z,k) = E(z,k)/H(z,k)$$

Итак, адмиттанс – отношение тангенциальных составляющих напряженности магнитного  $H(z,k)$  и электрического  $E(z,k)$  полей:

$$Y(z,k) = H(z,k)/E(z,k) \tag{1.2.4}$$

Амплитудный коэффициент отражения выражается через адмиттанс на внешней границе покрытия:

$$r(k) = \frac{q_a - Y(z_a, k)}{q_a + Y(z_a, k)} \tag{1.2.5}$$

где  $q_a$  – эффективный показатель преломления внешней среды.

Адмиттанс является характеристикой волнового движения в данной точке, а не характеристикой среды, в которой волна распространяется. Для расчета  $Y(z,k)$  используется рекуррентное соотношение и соответствующие граничные условия:

$$Y_{j-1} = \frac{Y_j + iN_j \operatorname{tg} \Phi_j}{1 + i(Y_j / N_j) \operatorname{tg} \Phi_j}, \quad Y_m = N_m \quad (1.2.6)$$

где  $\Phi_j = 2\pi N_j d_j / \lambda$  – фазовая толщина  $j$ -ого слоя.

Энергетические коэффициенты отражения ( $R$ ) и пропускания ( $T$ ) вычисляются с помощью  $Y_0$ :

$$R = |(1 - Y_0 / n_0) / (1 + Y_0 / n_0)|^2$$

$$T = [\operatorname{Re}\{N_{m+1}\} / n_0] | (n_0 / N_{m+1}) \exp \left\{ -i \sum_{j=0}^m \Phi_j \right\} \prod_{j=0}^m [(N_{j+1} + Y_j) / (N_j + Y_j)] |^2 \quad (1.2.7)$$

На формулах (1.2.6) и (1.1.7) базируется «адмиттансный» метод расчета оптических свойств пленочных систем. Следовательно, зная структуру покрытия и параметры окружающих сред, с помощью приведенных выше формул можно рассчитать оптические характеристики покрытия – коэффициенты отражения, пропускания и поглощения, а также фазовые сдвиги, возникающие при отражении и прохождении через него световой волны, для заданных длин волн и углов падения [2]. Однако, этот метод неудобен для расчета систем, состоящих из слоев неравной оптической толщины.

#### 1.2.4. Матричный метод

Наиболее распространенным методом расчетов спектров является матричный метод. Идея этого метода заключается в использовании характеристических матриц  $M_j$ . В основе нахождения характеристических матриц лежит подход, основанный на решении уравнений Максвелла для электромагнитной волны внутри системы слоев. Общая теория этого расчета, развитая Абелем [49], изложена в работах [39, 43].

Взаимодействие световой волны с произвольным покрытием следует из решения системы уравнений Максвелла:

$$\operatorname{rot} E = i \frac{\omega}{c} \mu H,$$

$$\operatorname{rot} H = -i \frac{\omega}{c} \varepsilon E,$$

$$\operatorname{div} E = 0,$$

$$\operatorname{div} H = 0$$

Здесь  $\mathbf{E}$  – вектор электрического поля световой волны,  $\mathbf{H}$  – вектор магнитного поля,  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды,  $\mu$  – магнитная проницаемость.

Эту систему несложно превратить в одно уравнение второго порядка относительно электрического или магнитного полей и искать решение в виде плоских волн, что вытекает из основного условия задачи – наличия плоских границ раздела между слоями. При рассмотрении оптических задач целесообразно находить решение для электрического поля световой волны, поскольку магнитная проницаемость в оптической области частот равна для всех материалов единице, т.е. магнитное поле оказывается вторичным. Таким образом, получается одно волновое уравнение:

$$\Delta E + k^2 E = 0,$$

где  $k^2 = \omega^2 \varepsilon \mu / c^2$

Решение этого уравнения для слоя с номером  $j$  может быть записано в виде:

$$E = a_j E_{1j}(x - x_j) + b_j E_{2j}(x - x_j),$$

где  $x_j$  – граница  $j$ -ого слоя;  $a_j, b_j$  – коэффициенты, определяемые из условий непрерывности поля на границах слоя.

$$\begin{pmatrix} a_j \\ b_j \end{pmatrix} = C_j \begin{pmatrix} a_{j-1} \\ b_{j-1} \end{pmatrix},$$

где  $C_j$  – матрица преобразования коэффициентов решения от одной среды к другой.

**Нормальное падение света.** Взаимодействие плоской монохроматической световой волны с неоднородной средой, какой является многослойное покрытие, описывается с помощью волнового уравнения, вытекающего из уравнений Максвелла, в котором волновой вектор изменяется от слоя к слою. Решая

граничную задачу при нормальном падении электромагнитной волны, можно получить матричное уравнение, связывающее полные тангенциальные составляющие векторов электрического и магнитного полей в  $j$  и  $(j-1)$  слоях [2, 39, 43, 45]:

$$\begin{pmatrix} E_{j-1} \\ H_{j-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \Phi_j & (i/N_j) \sin \Phi_j \\ iN_j \sin \Phi_j & \cos \Phi_j \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_j \\ H_j \end{pmatrix} = M_j \begin{pmatrix} E_j \\ H_j \end{pmatrix}, \quad (1.2.8)$$

где  $\Phi_j = 2\pi N_j d_j / \lambda$  – фазовая толщина  $j$ -слоя.

Матрица  $M_j$ , имеющая размер  $(2 \times 2)$ , называется характеристической матрицей, или матрицей интерференции  $j$ -слоя. Ее детерминант равен единице.

Выписав последовательно соотношение (1.2.8) для всех слоев покрытия, начиная с  $m$ -го, и исключив значения амплитуд полей на всех границах внутренних слоев последовательной подстановкой, можно получить выражение, связывающее амплитуды электрического и магнитного полей на нулевой и  $m$ -границах:

$$\begin{pmatrix} E_0 \\ H_0 \end{pmatrix} = M_1 M_2 M_3 \dots M_m \begin{pmatrix} E_m \\ H_m \end{pmatrix} = M^{sys} \begin{pmatrix} E_m \\ H_m \end{pmatrix} = \prod_{j=1}^m M_j \begin{pmatrix} 1 \\ N_{m+1} \end{pmatrix} \quad (1.2.9)$$

Матрица  $M^{sys}$  называется характеристической матрицей интерференционной системы. Из выражения (1.2.9) следует, что для определения характеристической матрицы системы необходимо перемножить матрицы отдельных слоев в последовательности, совпадающей с направлением распространения световой волны. Поскольку детерминант матрицы  $M^{sys}$  равен произведению детерминантов матриц отдельных слоев, то он также равен единице.

Пусть  $m_{ij}$  – матричные элементы так называемой характеристической матрицы многослойной системы, которую обычно записывают в виде:

$$M^{sys} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} \quad \text{или} \quad M^{sys} = \begin{pmatrix} \mu_{11} & i\mu_{12} \\ i\mu_{21} & \mu_{22} \end{pmatrix} \quad (1.2.10)$$

Тогда выражения для расчета амплитудных коэффициентов отражения  $r$  и пропускания  $t$  плоской электромагнитной волны связаны с матричными элементами соотношениями:

$$\begin{aligned} r &= (N_0\mu_{11} + iN_0N_{m+1}\mu_{12} - i\mu_{21} - N_{m+1}\mu_{22}) / (N_0\mu_{11} + iN_0N_{m+1}\mu_{12} + i\mu_{21} + N_{m+1}\mu_{22}) \\ t &= 2N_0 / (N_0\mu_{11} + iN_0N_{m+1}\mu_{12} + i\mu_{21} + N_{m+1}\mu_{22}) \end{aligned} \quad (1.2.11 \text{ а})$$

$$\begin{aligned} r &= [(m_{11} + N_{m+1}m_{12})N_0 - (m_{21}N_{m+1}m_{22})] / [(m_{11} + N_{m+1}m_{12})N_0 + (m_{21} + N_{m+1}m_{22})] \\ t &= 2N_0 / [(m_{11} + N_{m+1}m_{12})N_0 + (m_{21} + N_{m+1}m_{22})] \end{aligned} \quad (1.2.11 \text{ б})$$

Энергетические коэффициенты отражения  $R$  и пропускания  $T$  многослойной системы и соответствующие фазовые сдвиги легко определяются из выражений (1.2.11 а) или (1.2.11 б).

$$\begin{aligned} R &= |r|^2, \\ T &= |t|^2 [Re\{N_{m+1}\}] / N_0 \end{aligned} \quad (1.2.12)$$

Из уравнений (1.2.8) и (1.2.9) следует, что многослойная система описывается матрицей, элементы которой не зависят от оптических параметров окружающих сред. Кроме того, изменение фазовой толщины  $\Phi_j$  и показателя преломления  $N_j$  влияет только на матрицу  $j$ -слоя. При этом частные произведения  $\prod_{i=1}^{j-1} M_i$  и  $\prod_{i=j+1}^m M_i$  остаются неизменными. Эти свойства полезны при изучении влияния параметров слоя на характеристики покрытия, а также при решении различных конструкторских задач, поскольку позволяют значительно сократить объем вычислений.

При нормальном падении электромагнитной волны фазовая толщина  $\Phi_j$ , комплексный показатель преломления  $N_j$  и матричные элементы характеристической матрицы  $j$ -слоя определяются выражениями:

$$\begin{aligned}
\Phi_j &= 2\pi N_j d_j / \lambda, \quad N_j = n_j - i\kappa_j, \\
\operatorname{Im}\{m_{11}\} &= \operatorname{Im}\{m_{22}\} = \cos\{2\pi n_j d_j / \lambda\} \operatorname{ch}\{\kappa_j d_j\}, \\
\operatorname{Re}\{m_{11}\} &= \operatorname{Re}\{m_{22}\} = -\sin\{2\pi n_j d_j / \lambda\} \operatorname{sh}\{\kappa_j d_j\}, \\
\operatorname{Im}\{m_{12}\} &= (n_j A + \kappa_j B) / C, & \operatorname{Re}\{m_{12}\} &= -(\kappa_j A - n_j B) / C, \\
\operatorname{Im}\{m_{21}\} &= n_j A - \kappa_j B, & \operatorname{Re}\{m_{21}\} &= -(\kappa_j A - n_j B), \\
A &= \sin\{2\pi n_j d_j / \lambda\} \operatorname{ch}\{\kappa_j d_j\}, & B &= \cos\{2\pi n_j d_j / \lambda\} \operatorname{sh}\{\kappa_j d_j\}.
\end{aligned} \tag{1.2.13}$$

В случае, когда слои покрытия характеризуются вещественными показателями преломления  $N_j = n_j$ , формулы (1.2.13) значительно упрощаются:

$$\begin{aligned}
\Phi_j &= 2\pi n_j d_j / \lambda, \\
\operatorname{Re}\{m_{11}\} &= \operatorname{Re}\{m_{22}\} = \cos\{2\pi n_j d_j / \lambda\}, \\
\operatorname{Im}\{m_{11}\} &= 0, & \operatorname{Im}\{m_{22}\} &= 0, \\
\operatorname{Im}\{m_{12}\} &= \sin\{2\pi n_j d_j / \lambda\} / n_j, & \operatorname{Re}\{m_{12}\} &= 0, \\
\operatorname{Im}\{m_{21}\} &= n_j \sin\{2\pi n_j d_j / \lambda\}, & \operatorname{Re}\{m_{21}\} &= 0.
\end{aligned} \tag{1.2.14}$$

**Угловое падение света.** Формулы (1.2.8) - (1.2.14) пригодны для расчета спектров отражения и пропускания при нормальном падении света на многослойную систему, но их можно использовать для всех расчетов при наклонном падении света посредством введения определенного формализма. Вводятся представления об «эффективном показателе преломления» и «эффективной фазовой толщине», которые не имеют физического смысла и в определенной степени делают последовательное рассмотрение реальной структуры электромагнитного поля в пленочной системе менее строгим. Однако их использование приводит к математически корректным результатам. Таким образом, в случае наклонного падения света в формулах (1.2.8)-(1.2.14) достаточно заменить показатель преломления  $N_j$  и фазовую толщину  $\Phi_j$  «эффективным показателем преломления»  $N_j^{eff}$  и «эффективной фазовой толщиной»  $\Phi_j^{eff}$ , вычисляемым по формулам:

$$N_j^{eff} = \begin{cases} N_j / (\cos \theta_j) & (p - \text{поляризация}) \\ N_j \cos \theta_j & (s - \text{поляризация}) \end{cases} \quad (1.2.15)$$

$$\Phi_j^{eff} = \Phi_j \cos \theta_j \quad (\text{как для } p\text{-, так и для } s\text{-поляризации})$$

Выражение для  $\cos \theta_j$  имеет вид [34]:

$$\begin{aligned} \cos \theta_j &= [(\{p_j^2 + q_j^2\}^{1/2} + p_j) / 2]^{1/2} - i[(\{p_j^2 + q_j^2\}^{1/2} - p_j) / 2]^{1/2}, \\ p_j &= 1 + (\kappa_j^2 - n_j^2) [(n_0 \sin \theta_0) / (n_j^2 + \kappa_j^2)]^2, \\ q_j &= -2n_j \kappa_j [n_0 \sin \theta_0] / (n_j^2 + \kappa_j^2)]^2. \end{aligned}$$

Используя соотношения (1.2.15), можно вычислить коэффициенты отражения ( $R_s$ ,  $R_p$ ) и пропускания ( $T_s$ ,  $T_p$ )  $s$ - и  $p$ -поляризованных компонентов излучения, а затем определить истинные спектральные характеристики интерференционного покрытия. Если падающий свет не поляризован, то коэффициенты отражения и пропускания вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} R &= (R_p + R_s) / 2, \\ T &= (T_p + T_s) / 2. \end{aligned} \quad (1.2.16)$$

При эллиптической поляризации падающего излучения с относительными амплитудами  $a_p$  и  $a_s$  используются формулы:

$$\begin{aligned} R &= (a_p^2 + a_s^2 R_s) / (a_p^2 + a_s^2), \\ T &= (a_p^2 T_p + a_s^2 T_s) / (a_p^2 + a_s^2). \end{aligned} \quad (1.2.17)$$

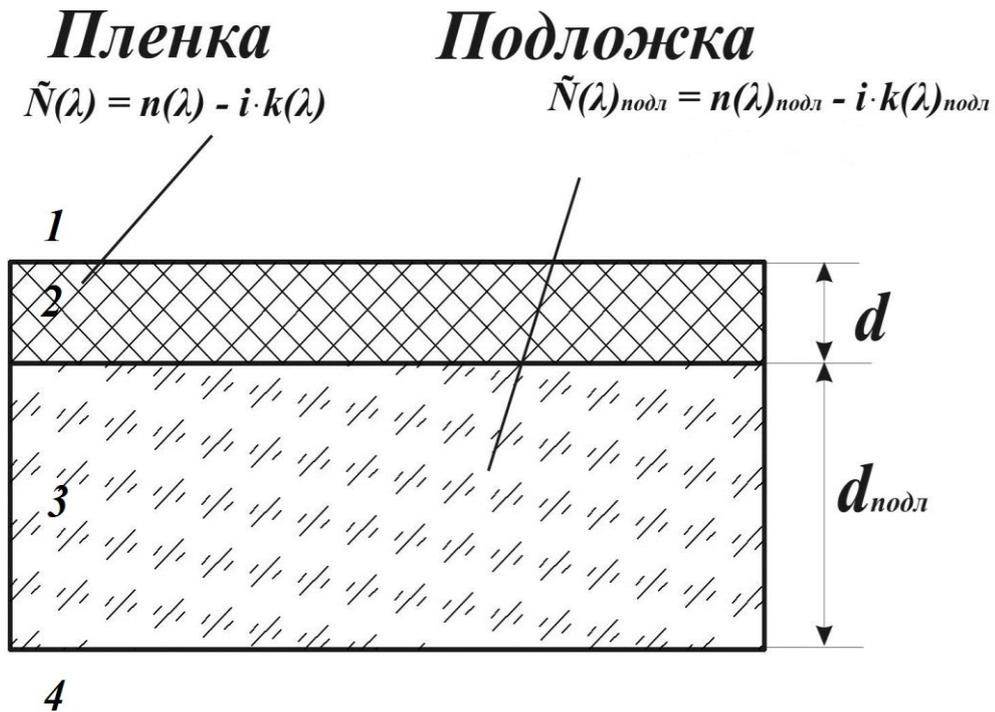
В общем случае при наклоне плоскости поляризации падающей волны к плоскости падения под углом  $\delta$ :

$$\begin{aligned} R &= R_p \cos^2 \delta + R_s \sin^2 \delta, \\ T &= T_p \cos^2 \delta + T_s \sin^2 \delta. \end{aligned} \quad (1.2.18)$$

Все соотношения для расчета оптических характеристик ИП выведены на основе математической модели, описанной ранее в п.1.2.1. [2, 39, 43, 45]. Они использовались в программах анализа и синтеза интерференционных покрытий Film Manage.

**1.3.Методика определения показателя  
преломления непоглощающих пленок**

В общем виде, вещества пленки и подложки будем считать однородными и поглощающими. Система пленка-подложка (П-П) находится в воздухе (показатель преломления  $N_1=N_4=1$ ). Комплексный показатель преломления пленки обозначим, как  $N_f=n_f - ik_f$ , а подложки  $N_s=n_s - ik_s$  (см. рис. 1.3.1). Геометрическая толщина пленки  $d_f$  сравнима с длиной волны и поэтому при прохождении через нее света наблюдаются интерференционные явления. Толщина подложки  $d_s$  намного больше длины волны и интерференционные явления не наблюдаются. Падение света будем считать нормальным.



**Рис. 1.3.1.** Система «пленка-подложка»

Искомыми величинами являются геометрическая толщина пленки  $d_f$ , ее показатели преломления  $n(\lambda)$  и поглощения  $k(\lambda)$ .

Предварительно физическая толщина пленки  $d_f$  определяется из спектров пропускания по положениям экстремумов в шкале длин волн.

Для определения показателей преломления пленок по спектрам пропускания и отражения в системе «пленка-подложка» использовалась методика, описанная в [18]. Подложка считается слабо-поглощающей и характеризуется вещественным показателем преломления  $n_s$  (т.е.  $N_s = n_s$ ). Дисперсия показателя преломления  $n_f$  и показателя поглощения  $k_f$  тонких пленок, свободных от сильных полос поглощения в исследуемом спектральном интервале, определялась спектрофотометрическим способом.

Точность этого метода определяется двумя факторами. Во-первых, точностью измерения коэффициентов пропускания (или отражения), т.е. методикой измерений. Во-вторых, разностью показателей преломления пленки  $n_f$  и подложки  $n_s$ . Чем больше эта разность, тем больше амплитуды в экстремумах пропускания (отражения) и, соответственно, тем меньше погрешность измерения.

Так как спектрофотометрические измерения по абсолютной величине пропускания не лишены инструментальной погрешности, а математическая модель с использованием  $T_{max}(\lambda)$  и  $T_{min}(\lambda)$  является приближением, уточненные значения  $n_f$  и  $k_f$  в точках экстремума были получены решением прямой задачи расчета спектра пропускания тонкой пленки на прозрачной подложке по методике, описанной в работе [18].

Для поиска оптических констант (ОК) этим методом в основном используются спектры пропускания по следующим причинам. Для получения спектров отражения на спектрофотометре используется специальная отражательная приставка. В данной приставке направление падения света на образец отлично от нормального на  $6^\circ$ - $10^\circ$  (в зависимости от модели приставки), а также происходят поляризационные явления. Расчеты на основе матричного метода показали, что нельзя пренебрегать угловым падением света и поляризацией света в специальной отражательной приставке. Поэтому при малых значениях поглощения пленки, использовались спектры пропускания, но при больших значениях поглощения для вычисления ОК применять только спектры пропускания недостаточно и используются как спектры пропускания, так и

спектры отражения. Это возможно вследствие того, что при больших значениях поглощения можно пренебречь "искажениями", вносимыми отражательной приставкой.

Этот метод основывается на процедуре построения плавных огибающих интерференционных максимумов и минимумов спектра пропускания пленки на плоскопараллельной прозрачной подложке с заведомо известной зависимостью  $n_s(\lambda)$  и дальнейшем рассмотрении кривых  $T_{max}(\lambda)$  и  $T_{min}(\lambda)$  как непрерывных функций.

При выводе выражений для расчета оптических постоянных  $n_f$  и  $k_f$  пленки используются выражения для экстремумов пропускания пленки  $T_{max}$  и  $T_{min}$ :

$$T_{\max} = \frac{16n_f^2 n_s}{(n_f + 1)^3 (n_s^2 + n_f) e^\gamma - (n_f - 1)^3 (n_s^2 - n_f) e^{-\gamma} + 2(n_f^2 - 1)(n_s^2 - n_f^2)}, \quad (1.3.1)$$

$$T_{\min} = \frac{16n_f^2 n_s}{(n_{2f} + 1)^3 (n_s^2 + n_f) e^\gamma - (n_f - 1)^3 (n_s^2 - n_f) e^{-\gamma} - 2(n_f^2 - 1)(n_s^2 - n_f^2)}$$

где  $\gamma = 4\pi k_f d / \lambda$ ,  $d$  – геометрическая толщина слоя,  $\lambda$  – длина волны,  $n_s$  – показатель преломления материала подложки,  $n_f$  – показатель преломления пленки.

Если рассмотреть функцию вида

$$F = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max} T_{\min}}, \quad (1.3.2)$$

то на основании (1.3.1), (1.3.2) можно получить выражение, не содержащее зависящих от показателя поглощения членов  $e^{\pm\gamma}$ :

$$F = \frac{(n_f^2 - n_s^2)(n_f^2 - 1)}{4n_f^2 n_s}. \quad (1.3.3)$$

Из (1.3.2) и (1.3.3) непосредственно следует, что

$$n_f = \sqrt{N + \sqrt{N^2 - n_s^2}}, \quad (1.3.4)$$

где

$$N = \frac{1 + n_s^2}{2} + 2n_s F. \quad (1.3.5)$$

Для нахождения  $k_f$  пленки используется функция вида:

$$H = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{T_{\max} T_{\min}} \quad (1.3.6)$$

После подстановки в (1.3.6) выражений (1.3.1) и несложных преобразований получаем:

$$H = \frac{(n_f + 1)^3 (n_s^2 + n_f) e^\gamma - (n_f - 1)^3 (n_s^2 - n_f) e^{-\gamma}}{8n_s n_f^2}, \quad (1.3.7)$$

откуда следует соотношение, позволяющее непосредственно определить показатель поглощения слоя  $k_f$  (коэффициент экстинкции):

$$\beta = e^{\frac{4\pi k_f d}{\lambda}} = \frac{4n_s n_f^2 H + \sqrt{16n_s^2 n_f^4 H^2 + (n_f^2 - 1)^3 (n_s^4 - n_f^2)}}{(1 + n_f)^3 (n_f + n_s^2)}, \quad (1.3.8)$$

где

$$k_f = \frac{\lambda \ln \beta}{4\pi d}. \quad (1.3.9)$$

Недостатком этого метода является то, что фактически показатели преломления находятся для точек соответствующих экстремумам спектров. Поэтому, невозможно наблюдение тонких структур в дисперсионных

зависимостях, например, дисперсии показатели преломления в области дополнительных полос поглощения в пленках, отсутствующих в монокристаллах.

Для исследования оптических констант (ОК) мы использовали численные методы. В отличие от аналитических, они позволяют рассчитывать дополнительные дисперсионные зависимости. Они впервые наблюдались нами только при использовании, предложенной методики, описанной в разделе 1.5.

#### **1.4. Расчет спектров пропускания и отражения при наличии поглощения**

Рассмотрим оптическую систему, состоящую из поглощающей подложки с нанесенной на нее тонкой поглощающей пленкой, окруженных с обеих сторон воздухом (см. рис. 1.3.1). Выразим коэффициенты отражения  $R$  и пропускания  $T$  через параметры этой системы. При этом будем считать, что свет (с длиной волны  $\lambda$ ) падает нормально со стороны пленки. Параметры, относящиеся к подложке, будем обозначать с нижним индексом  $s$ , относящиеся к пленке – индексом  $f$ .

Геометрическую толщину пленки будем обозначать через  $d_f$ , ее показатели преломления и поглощения –  $n_f$ ,  $\kappa_f$ . Геометрическую толщину подложки обозначим через  $d_s$ , показатели преломления и поглощения соответственно через  $n_s$ ,  $\kappa_s$ . Будем также считать, что (относительные) магнитные проницаемости пленки и подложки равны 1. Поскольку падение света нормально, коэффициенты отражения и пропускания не зависят от поляризации. Для выражения этих коэффициентов через описанные выше величины используем [39]. Характеристическая матрица пленки равна:

$$M = \begin{pmatrix} \cos \xi & -(i/N) \sin \xi \\ -iN \sin(\xi) & \cos \xi \end{pmatrix}, \quad (1.4.1)$$

Пусть  $\xi = 2\pi n d / \lambda$ ,  $N_f = n_f - i\kappa_f$ , где  $N_f$  – комплексный показатель преломления, исследуемой пленки. Направление луча, падающего на рассматриваемую оптическую систему, т.е. направление от пленки к подложке, будем называть

положительным. Противоположное направление будем называть отрицательным. Коэффициенты отражения  $R_f$  и пропускания  $T_f$  пленки на подложке для луча, идущего в положительном направлении, получаются с помощью формул:

$$R_f = |r_f|^2, \quad T_f = n_s |t_f|^2, \quad (1.4.2)$$

где  $r_f$  и  $t_f$  – амплитудные коэффициенты отражения и пропускания

$$r_f = \frac{(\cos \xi + (-iN_s / N) \sin \xi) - (-iN \sin \xi + N_s \cos \xi)}{(\cos \xi + (-iN_s / N) \sin \xi) + (-iN \sin \xi + N_s \cos \xi)} = \frac{(1 - N_s) \cos \xi + i(N - N_s / N) \sin \xi}{(1 + N_s) \cos \xi - i(N - N_s / N) \sin \xi}$$

$$t_f = \frac{2}{(\cos \xi + (-iN_s / N) \sin \xi) + (-iN \sin \xi + N_s \cos \xi)} = \frac{2}{(1 + N_s) \cos \xi - i(N - N_s / N) \sin \xi}$$

Аналогичные формулы получаются для луча, идущего в отрицательном направлении, т.е. для коэффициентов отражения  $\tilde{R}_f$  и пропускания  $\tilde{T}_f$ .

Коэффициенты отражения и пропускания границы раздела подложка-воздух для света, идущего в положительном направлении, равны:

$$R_s = \left| \frac{N_s - 1}{N_s + 1} \right|^2, \quad T_s = n_s^{-1} \left| \frac{2N_s}{N_s + 1} \right|^2, \quad (1.4.3)$$

где  $N_s = n_s + ik_s$  – комплексный показатель преломления подложки,  $T_s$  и  $R_s$  – пропускание и отражение в подложке.

Обозначим интенсивность света, входящего в подложку в положительном направлении  $A_1$ , интенсивность света, подходящего к границе раздела подложки с воздухом –  $B_1$ . Интенсивность выходящего из подложки в воздух света равна  $T$ . Пусть для отрицательного направления интенсивность света, входящего в подложку –  $A_2$ , интенсивность света, падающего (из подложки) на пленку –  $B_2$ , интенсивность выходящего из пленки света –  $R$ . Считая, что интерференция света в подложке отсутствует, и, полагая  $\delta = \exp(-4\pi kd/\lambda)$  получаем на перечисленные выше величины следующую систему:

$$\begin{cases} A_1 = T_f + \tilde{R}_f B_2 \\ B_1 = A_1 \delta \\ T = T_s B_1 \\ A_2 = R_s B_1 \\ B_2 = A_2 \delta \\ R = R_f + \tilde{T}_f B_2 \end{cases}$$

Решая систему находим:

$$T = T_s \frac{T_f \delta}{1 - R_s \tilde{R}_f \delta^2}, \quad (1.4.4)$$

$$R = R_f + \tilde{T}_f \frac{R_s T_f \delta^2}{1 - R_s \tilde{R}_f \delta^2}. \quad (1.4.5)$$

Полученные уравнения использовались нами при составлении программного обеспечения, рассмотренного в разделе 1.6, для нахождения оптических констант пленок. А также при модернизации программы Film Manager, в которой вводилось поглощение в подложке и отражение от обратной стороны (см. 3 главу).

### **1.5. Методика определения оптических констант пленок при наличии поглощения**

Как уже говорилось выше, в нашей работе для исследования оптических констант (ОК) использовался спектрофотометрический метод, основанный на измерении интерференционной картины по спектрам пропускания и отражения подложки, на поверхность которой напылена (нанесена) пленка.

Для нахождения ОК мы использовали систему уравнений аналогичную [51]:

$$\begin{cases} \sum_i |T(\lambda_i)_{\text{эксн}} - T(\lambda_i)_{\text{теор}}| = F \\ \sum_i |R(\lambda_i)_{\text{эксн}} - R(\lambda_i)_{\text{теор}}| = F \end{cases} \quad (1.5.1)$$

где  $T(\lambda_i)_{\text{эксн}}$  и  $R(\lambda_i)_{\text{эксн}}$  – экспериментальные спектры, а  $T(\lambda_i)_{\text{теор}}$  и  $R(\lambda_i)_{\text{теор}}$  – теоретические (расчетные) значения энергетических коэффициентов отражения и пропускания системы «пленка-подложка»;  $\lambda_i$  – текущая длина волны;  $F$  – функция качества.

В системе (1.5.1) расчет оптических констант ведется путем поиска таких значений толщины, показателей преломления и поглощения пленок, при которых теоретическая кривая пропускания или отражения максимально совпадает с экспериментальной, т.е.  $F \rightarrow 0$ .

В нашей работе был реализован поиск минимума функции качества  $F$  одиночной пленки при варьировании в заданном спектральном диапазоне показателей преломления  $n_f(\lambda)$ , показателей поглощения  $k_f(\lambda)$  и ее геометрической толщины  $d_f$ . Для оценки степени совпадения кривых в программе (см. 1.6) вводилась нормированная функция качества в виде:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^N |M_{\text{теор}}(n, k, d, \lambda_i) - M_{\text{эксн}}(\lambda_i)|^2}{N}, \quad (1.5.2)$$

где  $M_{\text{теор}}$  - коэффициент отражения  $R$  или пропускания  $T$ , которые можно рассчитать по формулам, выведенным в разделе 1.4;  $M_{\text{эксн}}$  - теоретические значения спектров отражения  $R$  или пропускания  $T$ ,  $\lambda_i$  – текущее значение длины волны.

Используемая, нами функция качества в виде выражения (1.5.2) отличается от функции качества, применяемой при синтезе оптических покрытий [51]. Отличие заключается в том, что при нахождении минимума функции качества варьируются не толщины пленок, а показатели поглощения и преломления [52-56].

Для нахождения минимума функции качества использовалась программа, написанная мною на языке Wolfram Mathematica - 8.0, рассмотренная в разделе 1.6.

При обработке спектров для получения оптических констант мы использовали две методики. Первая методика базируется на нахождении минимума функции качества, как это описано выше, однако вследствие разброса точек спектра она не давала удовлетворительной сходимости результатов.

Вторая методика базируется на предложенном способе коррекции спектров пропускания и отражения, т.е. на исключении поглощения в системе «пленка – подложка» и дальнейшей обработкой по нахождению минимума функции качества.

Для вычисления пропускания и отражения нами была выбрана математическая модель «пленка – подложка» (см. рис. 1.3.1). Для вычисления пропускания  $T_{теор}$  и отражения  $R_{теор}$  системы «пленка-подложка» использовался матричный метод и аналитические выражения приведенные в классической работе М. Борна и Э. Вольфа [39]. Условимся, что  $f$  – пленка,  $s$  – подложка.

Система уравнений (1.5.1) при  $F=0$  не имеет аналитического решения, поэтому для решения обратной задачи нахождения показателей преломления  $n_f$  и показателей поглощения  $k_f$  пленки по спектрам, необходимо применять численные методы [22,25,38] минимизации  $F$  в совокупности с различными методиками обработки спектров.

В данной работе предложена методика, базирующаяся на нахождении оптических спектров пленки, в которой исключено поглощение. Рассмотрим ее. Пусть известны все параметры оптической системы, в частности, измеренные значения пропускания ( $T=T_{эксн}$ ) и отражения ( $R=R_{эксн}$ ), кроме показателей преломления  $n_f$  и показателей поглощения  $k_f$  пленки. Поиск ОК проводился в несколько этапов. Известно, что и в пленке, и в подложке присутствует поглощение  $\sum A=A_s + A_f$ , которое можно найти из спектров пропускания и

отражения:  $\sum A = I - T - R$ . Предварительно определялись константы подложки спектрофотометрическим методом по спектрам пропускания  $T_s$  и отражения  $R_s$ .

Поглощение в подложке определялось:  $A_s = I - T_s - R_s$ . Пропускание  $T_{(f+s)}$  и отражение  $R_{(f+s)}$  в подложке и в пленке с поглощением имеет вид:

$$T_{(f+s)} = T + f_T(A_f, A_s, n_s, n_f); R_{(f+s)} = R + f_R(A_f, A_s, n_s, n_f) \quad (1.5.3)$$

где  $A_f$  и  $A_s$  - поглощение в пленке и в подложке,  $f_T$  и  $f_R$  - функции, которые можно рассчитать по формулам (1.4.1–1.4.5). Для их нахождения в аналитическом виде использовалось разложение в степенной ряд Тейлора для  $T$  и  $R$  [57]. Раскладывая (1.5.3) имеем:

$$T_{(f+s)} - T = (dT/dA_s)A_s + (dT/dA_f)A_f + 0.5(d^2T/dA_s^2)A_s^2 + 0.5(d^2T/dA_f^2)A_f^2 + 0.5(d^2T/(dA_s dA_f))A_s A_f + \dots \quad (1.5.4)$$

$$R_{(f+s)} - R = (dR/dA_s)A_s + (dR/dA_f)A_f + 0.5(d^2R/dA_s^2)A_s^2 + 0.5(d^2R/dA_f^2)A_f^2 + 0.5(d^2R/(dA_s dA_f))A_s A_f + \dots \quad (1.5.5)$$

Пренебрегая членами второго порядка малости, имеем:

$$T_{(f+s)} - T = (dT/dA_s)A_s + (dT/dA_f)A_f = f_{Ts}A_s + f_{Tf}A_f \quad (1.5.6)$$

$$R_{(f+s)} - R = (dR/dA_s)A_s + (dR/dA_f)A_f = f_{Rs}A_s + f_{Rf}A_f \quad (1.5.7)$$

где численные значения коэффициентов  $f_{Ts}$ ,  $f_{Tf}$ ,  $f_{Rs}$ ,  $f_{Rf}$  находились с использованием модернизированной нами программы Film Manager, в которой учтено отражение от обратной стороны и вводится поглощение и толщина подложки по формулам, рассмотренным в разделе 1.4.

В качестве непоглощающей подложки мы использовали пластины селенида цинка (ZnSe), поглощение в которых не превышало 0.1–0.2% и им можно пренебречь, т.е. считать  $A_s = 0$ , тогда уравнения (1.5.6-1.5.7) имеют вид:

$$T_{(f+s)} - T = (dT / dA_f) A_f = f_{Tf} A_f \quad (1.5.8)$$

$$R_{(f+s)} - R = (dR / dA_f) A_f = f_{Rf} A_f \quad (1.5.9)$$

и их можно записать в виде:

$$T_{(f+s)} = T + (C_1 + C_2 T_{(f+s)}) A_f \quad (1.5.10)$$

$$R_{(f+s)} = R + (C_3 + C_4 R_{(f+s)}) A_f \quad (1.5.11)$$

где  $C_1 - C_4$  – это постоянные коэффициенты, которые находились численно с точностью  $\pm 0.001$ .

Для нахождения этих коэффициентов была составлена система уравнений, в которых использовались значения пропускания (отражения) в максимумах и минимумах. Уравнения (1.5.10 -1.5.11) решались для двух значений пропускания или отражения в экстремумах и с помощью модернизированной программы Film Manager (о ней более подробно в главе 3) находились значения коэффициентов  $C_1$ - $C_4$ .

Для пленки с показателем преломления  $n_f \sim 1.3-1.4$  на подложке из селенида цинка численное решение для уравнения (1.5.10–1.5.11) имеет вид:

$$T_{корр.} = \frac{T + A_f C_1}{1 - A_f C_2}, \quad R_{корр.} = \frac{R + A_f C_3}{1 - A_f C_4}. \quad (1.5.12)$$

где  $C_1=0.195$ ,  $C_2=0.595$ ,  $C_3=0.209$ ,  $C_4=0.579$

Таким образом, для пленки с поглощением на непоглощающей подложке коррекция поглощения в них реализуется с помощью уравнений (1.5.12).

В качестве поглощающей подложки мы использовали кремний (Si). Поглощение в Si определяли для подложки без пленки:  $A_s = 1 - T_s - R_s$ . Вклад поглощения подложки  $A_s$  в отражение и пропускание имеет вид:

$$R_s = R + 0.35A_s \quad \text{и} \quad T_s = T + 0.65A_s, \quad (1.5.13)$$

где коэффициенты 0.35 и 0.65 определялись также численно с помощью программы Film Manager.

Эти поправки используются в системе «пленка – подложка»:

$$T_{(f+s)} - T = (dT/dA_s)A_s + (dT/dA_f)A_f = 0.65A_s + f_{Tf}A_f \quad (1.5.14)$$

$$R_{(f+s)} - R = (dR/dA_s)A_s + (dR/dA_f)A_f = 0.35A_s + f_{Rf}A_f \quad (1.5.15)$$

Сначала проводилась коррекция на поглощение в подложке:

$$\begin{cases} T_s = T + 0.65A_s \\ R_s = R + 0.35A_s \end{cases} \quad (1.5.16)$$

После учета поглощения в подложке формулы (1.5.14 – 1.5.16) принимают вид:

$$\begin{cases} T_{(f+s)} = T_s + f_{Tf}A_f \\ R_{(f+s)} = R_s + f_{Rf}A_f \end{cases} \quad (1.5.17)$$

где  $f_{Tf}$  и  $f_{Rf}$  – мы брали в виде:  $f_{Tf} = C_1 + C_2T_{(f+s)}$  и  $f_{Rf} = C_3 + C_4R_{(f+s)}$

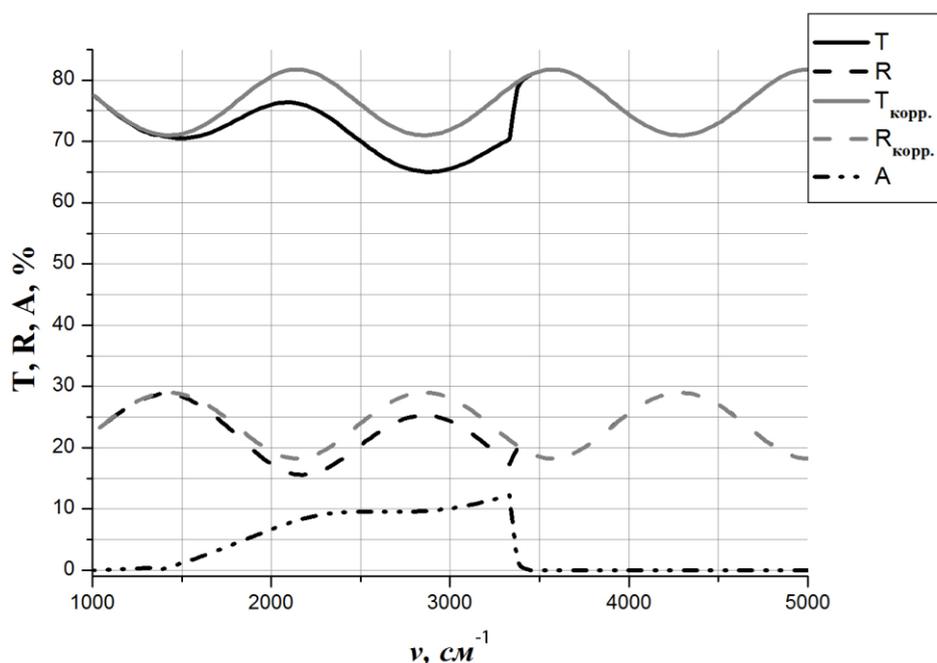
Используя выражения 1.5.14 – 1.5.16 решением уравнения 1.5.17 может быть представлено в виде:

$$T_{корр.} = \frac{T_s + A_f C_1}{1 - A_f C_2} \quad \text{и} \quad R_{корр.} = \frac{R_s + A_f C_3}{1 - A_f C_4} \quad (1.5.18)$$

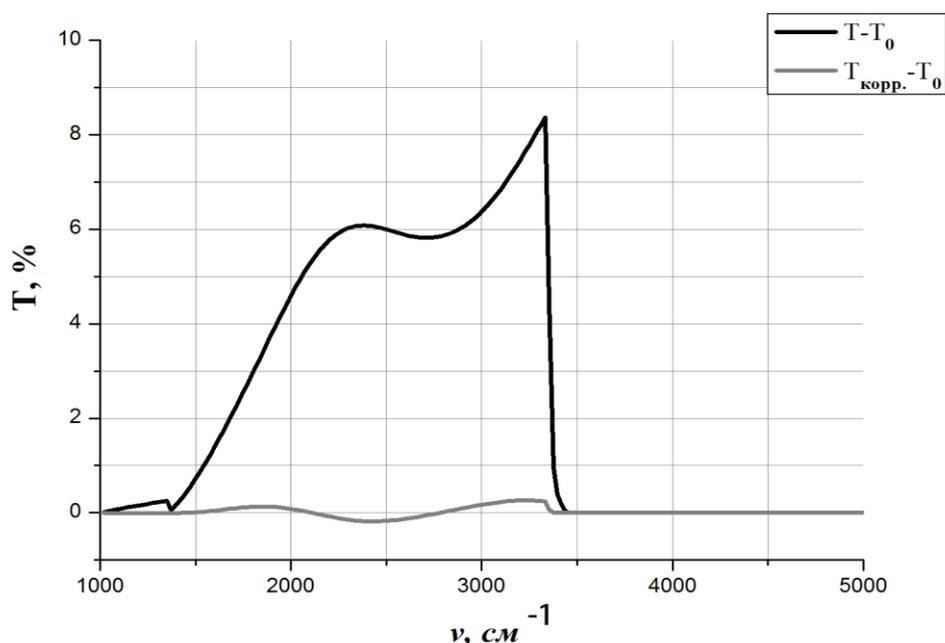
где численные значения коэффициентов для пленки с показателем преломления  $n_f \sim 1.3-1.4$  на подложке из кремния равны:  $C_1=0.9$ ,  $C_2=0.7$ ,  $C_3=0.41$ ,  $C_4=0.39$ . Эти коэффициенты также находились с помощью программы Film Manager. Для этого также составлялись два уравнения для двух значений пропускания или отражения в экстремумах, из которых и находились коэффициенты.

На рис. 1.5.1 приведены рассчитанные спектры пропускания ( $T$ ), отражения ( $R$ ), поглощения ( $A$ ) для пленки ( $n=1.35$ ) с поглощением и спектры пропускания и отражения пленки с коррекцией на поглощение ( $T_{корр}$  и  $R_{корр}$ ). Скорректированные спектры пропускания по формуле (1.5.12) практически совпадают со спектрами непоглощающей пленки ( $T_0$  и  $R_0$ ).

Оценка ошибки метода коррекции проводилась следующим образом. Использовались спектры без поглощения ( $T_0$ ), спектры с поглощением ( $T$ ) и спектры в которых проведена коррекция ( $T_{корр}$ ). На рис.1.5.2 показана зависимость разности пропускании нескорректированного спектра и спектра без поглощения ( $T-T_0$ ), а также зависимость разности пропускании спектров скорректированного и спектра без поглощения, т.е. ( $T_{корр}-T_0$ ). Для наглядности все графики даны в обратных сантиметрах. Из рис. 1.5.2 видно, что ошибки в скорректированных спектрах не превышают 0.25%, что соответствует ошибкам измерения экспериментальных спектров.



**Рис. 1.5.1** Спектры пропускания, отражения, поглощения для пленки  $\text{BaF}_2$  с поглощением и коррекция в этих спектрах на подложке из  $\text{ZnSe}$



**Рис.1.5.2.** Разность спектров пропускания в пленке без коррекции и с коррекцией со спектрами пропускания пленки без поглощения

Рассчитанные таким образом значения  $T_{\text{корр.}}$  и  $R_{\text{корр.}}$  определяются только значениями показателей преломления пленки и подложки для заданной длины волны, а также толщиной пленки. Нахождение дисперсии показателей преломления можно проводить независимо по спектрам пропускания или отражения. Таким образом, задача нахождения показателей преломления и поглощения пленки и ее толщины становится более простой и корректной по сравнению с нахождением констант из системы уравнений (1.4.4-1.4.5).

### **1.6. Программное обеспечение методики**

Для обработки результатов была написана программа на языке Wolfram Mathematica - 8.0 [58]. Программа предназначена для вычисления оптических характеристик пленки, т.е. толщины пленки  $d_f$  и функций  $n_f(\lambda)$ ,  $k_f(\lambda)$  по спектрам пропускания и отражения, по известным параметрам системы (толщина подложки  $d_s$ , оптические характеристики подложки, то есть, функции  $n_s, k_s$ ). Для этого в

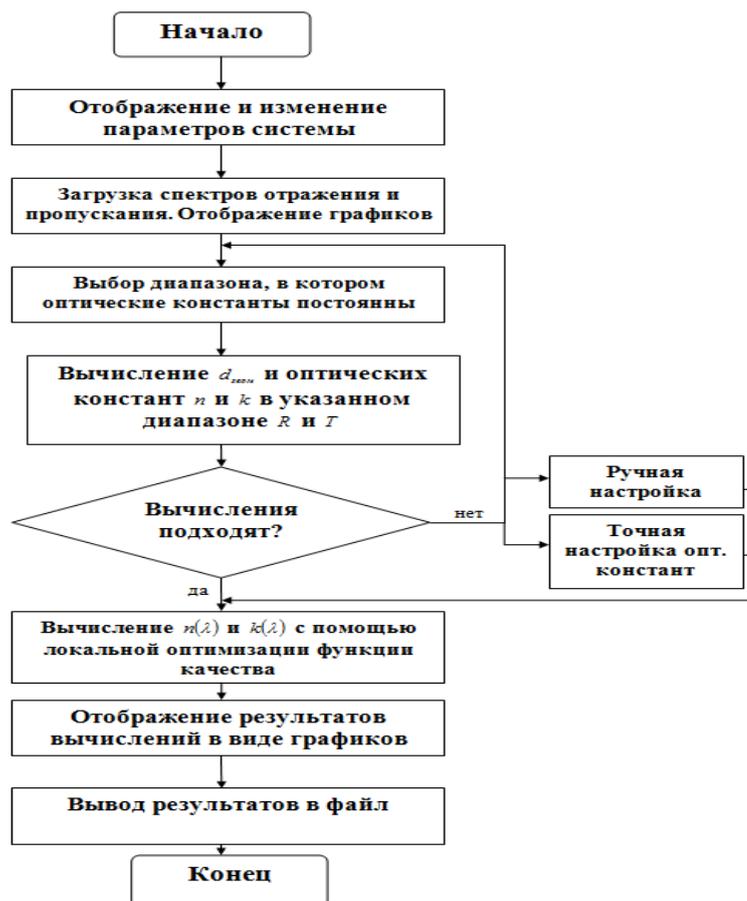
начале программы загружаем спектры отражения и пропускания подложки исследуемого покрытия. Программа с помощью формул, рассмотренных в главе 2 (раздел 2.2), рассчитывает эти значения. Алгоритм программы представлен на рис.1.6.1. Программа разбита на несколько шагов.

На первом шаге программа предлагает ознакомиться с параметрами системы и загрузить спектры отражения и пропускания всего оптического покрытия. Программа отображает полученные графики. Загруженное оптическое покрытие – это эталонная спектральная характеристика, к которой мы приводим исследуемую спектральную характеристику, посредством полного его наложения на эталонный. В качестве исследуемого покрытия выступает подложка, на нее мы наносим слой определенной оптической толщины с приблизительно заданными дисперсионными характеристиками.

На втором шаге пользователь указывает диапазон значений длин волн, для которых оптические константы ( $n$  и  $k$ ) почти не изменяются при изменении длины волны, т.е. исследуемая спектральная характеристика, отражения или пропускания совпадает с эталонной спектральной характеристикой (максимумы и минимумы должны совпадать). Программа в этом диапазоне аппроксимирует графики  $R$  и  $T$ , делая их теоретическими, вычисляя, таким образом, 3 значения:  $n$ ,  $k$  и  $d$ .

На третьем шаге происходит расчет оптических констант. Используя полученное на втором шаге значение геометрической толщины  $d$ , методом локальной оптимизации программа вычисляет величины  $n$  и  $k$  в середине указанного на шаге два диапазона, а затем и на всем протяжении спектра, загруженного на первом шаге.

Четвертый шаг – вывод данных. Программа предлагает сохранить найденные зависимости в *tsv* формате. При этом в файл сохраняется таблица с тремя столбцами: длина волны (мкм), показатель преломления  $n$ , показатель поглощения  $k$ .



**Рис.1.6.1.** Алгоритм программы для вычисления оптических характеристик пленки

Таким образом, описанным методом можно найти для заданного участка спектра дисперсионные зависимости оптических констант пленки  $n(\lambda)$   $k(\lambda)$ , и её геометрическую толщину  $d$ . Метод избавлен от трудностей, связанных с нахождением аналитических решений для всей системы (1.4.4-1.4.5). В программе, возможно, вручную подобрать константы. Для этого необходимо спектр разделить на небольшие области. И постепенно совмещать эталонную спектральную характеристику, с исследуемой. В итоге можно получить достаточно точные дисперсионные характеристики показателей преломления и поглощения пленки во всем требуемом диапазоне.

## ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ КОНСТАНТ ПЛЕНОК

### 2.1. Изготовление пленок

В настоящей работе оптические пленки изготавливались в вакууме на установке ВУ-2М путем электронно-лучевого испарения (ЭЛИ-22) материала из графитового тигля [7]. Напыление начиналось при достижении вакуума порядка  $3 \cdot 10^{-3}$  Па. Температура подложек при напылении не превышала  $150^\circ \text{C}$  с точностью  $\pm 5^\circ \text{C}$ . Контроль толщины напыляемых пленок и скоростей осаждения конденсата осуществлялся фотометрическим методом.

Для подложек из кремния (Si) и селенида цинка (ZnSe) контроль осуществлялся на длине волны контроля  $\lambda_0=1$  мкм, в которой все пленки имеют малое поглощение (менее 0.1 %) [7].

Толщина пленок определялась по экстремумам в спектре пропускания в тех спектральных областях, где поглощение в пленках отсутствует (или незначительно), и, где дисперсия показателя преломления невелика. Оптическую толщину пленок  $h$  на длине волны  $\lambda_0$  определяли по числу экстремумов:

$$h = dn(\lambda_0) = \frac{n(\lambda_0) m \lambda_k}{n(\lambda_k) 4}, \quad (2.1)$$

где  $\lambda_k$  - длина волны фотометрического контроля,  $n(\lambda_k)$  – показатель преломления пленки на длине волны контроля,  $d$  – геометрическая толщина пленки,  $n(\lambda_0)$  – показатель преломления на длине волны  $\lambda_0$ ,  $m$  – число экстремумов – максимумов или минимумов пропускания света. Относительная погрешность измерения пропускания фотометрической системы не превышала 0.5%. Это обеспечивало точность контроля толщины напыляемой пленки при  $m = 8-15$  не хуже 1% при напылении на стеклянный свидетель.

Скорость напыления определяли по времени, которое требовалось для напыления пленки с толщиной, соответствующей расстоянию между соседними

экстремумами. Толщина напыляемых пленок выбиралась таким образом, чтобы в исследуемом спектральном диапазоне в интерференционной картине было достаточное число экстремумов для построения огибающих  $T_{max}(\lambda)$  и  $T_{min}(\lambda)$ .

В ходе изготовления пленок для них оценивался коэффициент аккомодации (прилипания) по количеству испаренного вещества и по скорости роста пленки при фиксированной мощности, рассеиваемой тиглем с напыляемым веществом. Спектральные измерения образцов проводились на Фурье-спектрометре ФСМ-1201 (ООО Мониторинг, Россия) при комнатной температуре.

Пленкообразующие материалы на основе двойных фторидов (бифторидов) изготавливались путем напыления смесей фторидов из одного тигля. Температура испарения всех используемых фторидов близка друг к другу и отличается на  $\pm 30^{\circ}$  С для одинаковой упругости паров, кроме фторида иттрия, который более тугоплавкий и испаряется при большей температуре, чем другие фториды. Это не гарантирует, что пленка получается такого же состава, как и исходная смесь. Отличие в составе пленки от исходной смеси может составлять несколько процентов. Мы не стремились получить пленки с составом аналогичным к исходной смеси. Оценка по упругости паров показывает, что эти отличия не превышают 30% от исходной смеси, поэтому состав пленки задавался ориентировочно. Для нас важно было определить тенденцию к изменению оптических констант пленки.

## **2.2. Оптические константы подложек**

Существует зависимость показателей преломления и поглощения от марки кремния и селенида цинка, поэтому мы исследовали подложки, на которых непосредственно напылялись пленки. В качестве подложек мы использовали полированные диски из монокристаллического кремния марки КЭФ-4.5 и селенида цинка марки SVD.

Реальные значения ОК подложек могут отличаться от табличных значений [46]. Поэтому мы определяли оптические константы используемых подложек. Они определялись из спектров пропускания и отражения чистой подложки.

Интерес представляет диапазон от 2 до 12 мкм, в котором и определились ОК подложек из селенида цинка (ZnSe) и кремния (Si).

Зная, что для подложек без пленок спектры пропускания соответственно равны:

$$T_s = \frac{1 - R_s}{1 + R_s} \quad (2.2.1)$$

где  $R_s$  – отражение от одной поверхности пластины  $R_s = \left( \frac{1 - n_s}{1 + n_s} \right)^2$

Значение показателей преломления  $n$  находилось из уравнения (2.2.1), тогда:

$$T = \frac{1 - \left( \frac{1 - n_s}{1 + n_s} \right)^2}{1 + \left( \frac{1 - n_s}{1 + n_s} \right)^2} \quad (2.2.2)$$

Решая уравнение 2.2.2 находим показатель преломления:

$$n_s = \frac{1}{T_s} \pm \sqrt{\left( \frac{1}{T_s} \right)^2 - 1} \quad (2.2.3)$$

Для уравнения (2.2.3) существует два решения:  $n_s < 1$  и  $n_s > 1$ . В нашем случае показатель преломления подложки были больше единицы ( $n_s > 1$ ) и

уравнение (2.2.3) имеет вид:  $n_s = \frac{1}{T_s} + \sqrt{\left( \frac{1}{T_s} \right)^2 - 1}$ .

Значение показателя поглощения  $k$  определялось по поглощению  $A_s$  пленки и ее геометрической толщине  $d_s$  по формуле [39]:  $k = A_s \lambda_0 / 4\pi n d$ , где толщина пластины для ZnSe составляет 3 мм, а для Si – 0.32 мм.

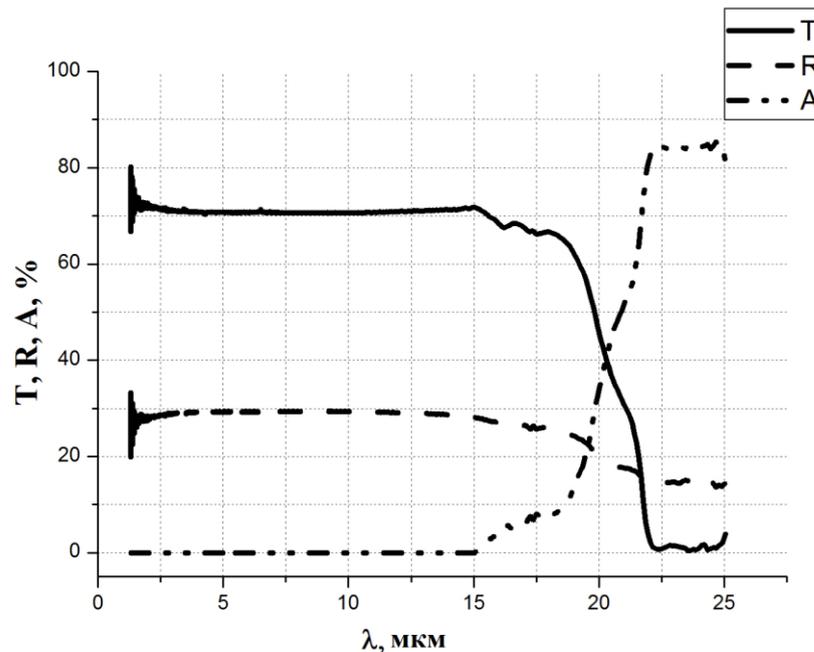
Вначале, рассмотрим подложку из ZnSe, поглощение которой в указанном диапазоне менее 0.2%. На рис. 2.2.1 представлена зависимость пропускания ( $T$ ), отражения ( $R$ ), поглощения ( $A$ ) для селенида цинка от длины волны ( $\lambda$ ).

На рис. 2.2.2 представлена зависимость показателя преломления и поглощения рассчитанная по формуле (2.2.3) от длины волны. В подложке из кремния присутствуют полосы поглощения на ряде длин волн, в исследуемом диапазоне спектра.

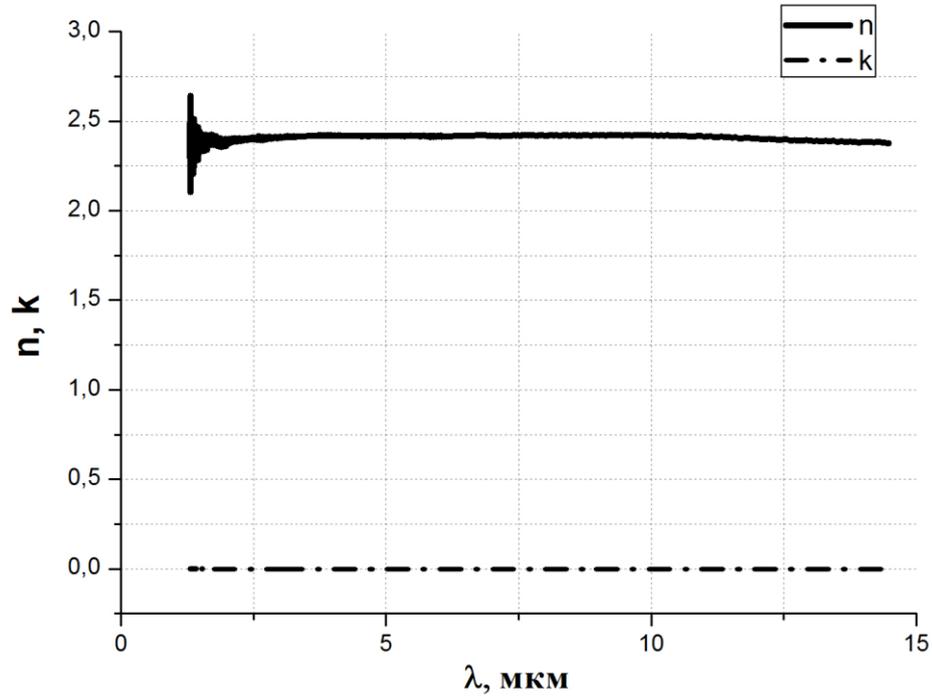
На рис. 2.2.3 представлена зависимость пропускания ( $T$ ), отражения ( $R$ ), поглощения ( $A$ ) для кремния от длины волны ( $\lambda$ ). Из этих спектров находилось поглощение:  $A_s = 1 - T_s - R_s$ . Коррекция поглощения проводилась по формуле (1.5.16).

На рис. 2.2.4 приведены спектры подложек из кремния, с коррекцией по указанной методике, рассмотренной в разделе 1.5. Из рис. 2.2.4 видно, что в спектрах отсутствуют пики поглощения и сумма  $T+R=1$  с точностью 0.001.

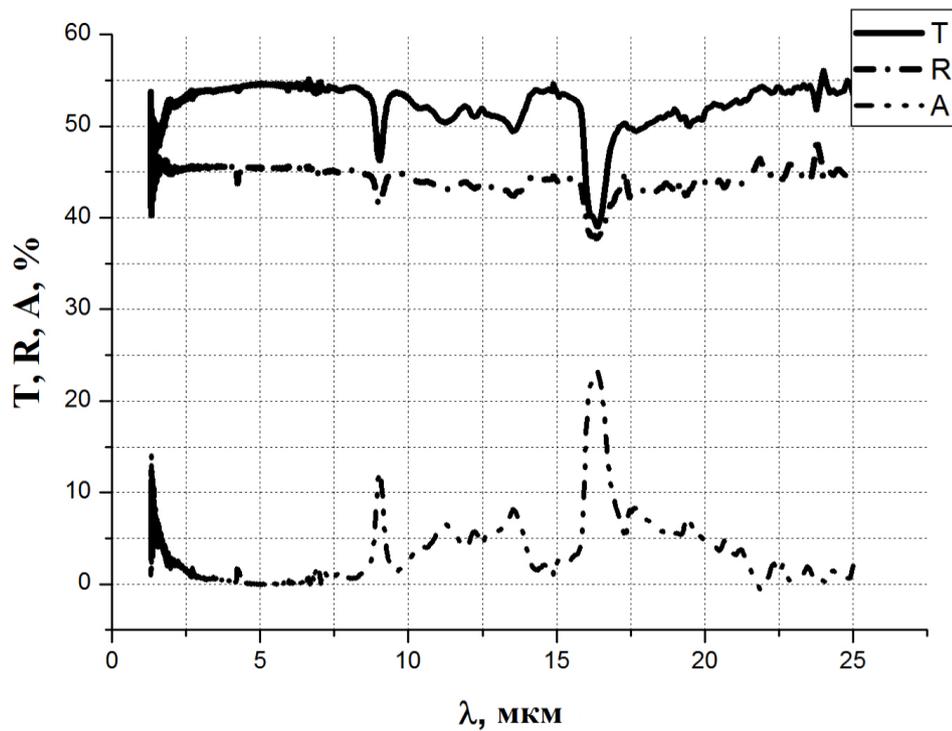
На рис. 2.2.5 представлена зависимость показателя преломления и поглощения от длины волны. Показатель преломления рассчитывался по формуле 2.2.3.



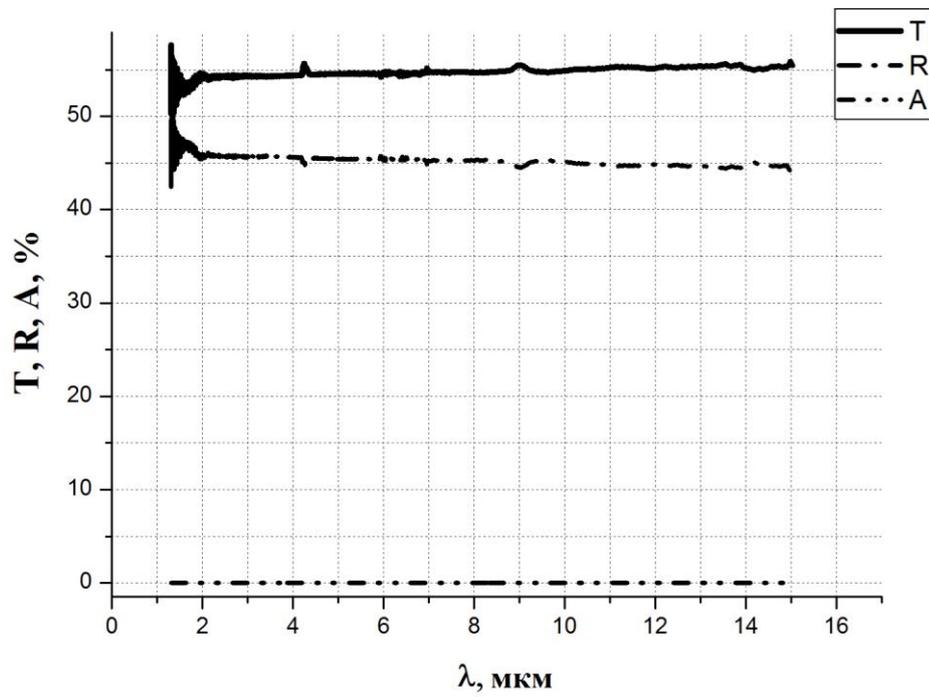
**Рис. 2.2.1.** Зависимость пропускания ( $T$ ), отражения ( $R$ ), поглощения ( $A$ ) для селенида цинка от длины волны ( $\lambda$ )



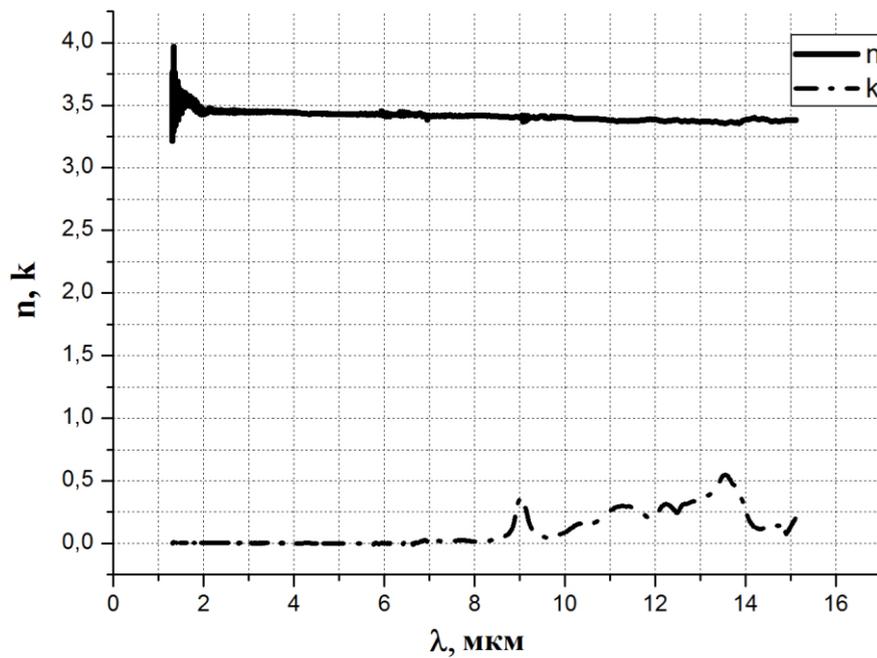
**Рис. 2.2.2.** Зависимость показателя преломления ( $n$ ) и поглощения ( $k \cdot 10^4$ ) от длины волны ( $\lambda$ ) для селенида цинка



**Рис. 2.2.3.** Зависимость пропускания ( $T$ ), отражения ( $R$ ), поглощения ( $A$ ) для кремния от длины волны ( $\lambda$ )



**Рис. 2.2.4.** Коррекция в спектрах пропускания ( $T$ ), отражения ( $R$ ), поглощения ( $A$ ) для кремния от длины волны ( $\lambda$ )



**Рис. 2.2.5.** Зависимость показателя преломления ( $n$ ) и поглощения ( $k \cdot 10^4$ ) от длины волны ( $\lambda$ )

**Таблица 2.2.1.** Значения показателей преломления материалов в ИК области спектра

Длина волны, мкм	Показатели преломления материалов			
	ZnSe [59] (справочные)	ZnSe (экспериментальные)	Si [59] (справочные)	Si (экспериментальные)
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
2.0	2.445	2.444	3.452	3.453
4.0	2.435	2.428	3.425	3.441
5.0	2.432	2.426	3.422	3.427
8.0	2.418	2.419	3.419	3.417
9.0	2.413	2.415	3.418	3.416
10.0	2.407	2.410	3.417	3.408
12.0	2.394	2.399	3.417	3.405

Из рис. 2.2.5 видно, что в области 9 мкм имеется пик поглощения, обусловленный наличием атомов кислорода в подложке. Это приводит к дополнительной дисперсионной зависимости показателя преломления кремния.

Видно, что экспериментальные показатели преломления практически совпадают со справочными данными. Отличие не превышает 0.3%.

### **2.3. Оптические константы пленок на основе фторида бария**

Оптические свойства тонких пленок зависят от условий их получения и зачастую отличаются от известных справочных данных, приведенных для монокристаллов или массивных образцов. Наряду с изучением свойств оптических тонкопленочных систем, большие усилия затрачиваются на поиски новых материалов для их реализации. Возможность варьировать не только толщину слоя, но и его показатель преломления является дополнительной степенью свободы при проектировании оптических покрытий. В этом смысле разработка технологии получения новых материалов в совокупности с созданием методов и средств получения тонких пленок этих материалов позволяет и в дальнейшем совершенствовать как технологию изготовления интерференционных покрытий, так и их эксплуатационные, спектральные и экономические

характеристики. Поэтому поиск новых материалов, а также работы по совершенствованию технологии получения тонких пленок и оптических покрытий на их основе являются актуальной и весьма перспективной с позиции накопления новых знаний и опыта областью исследований.

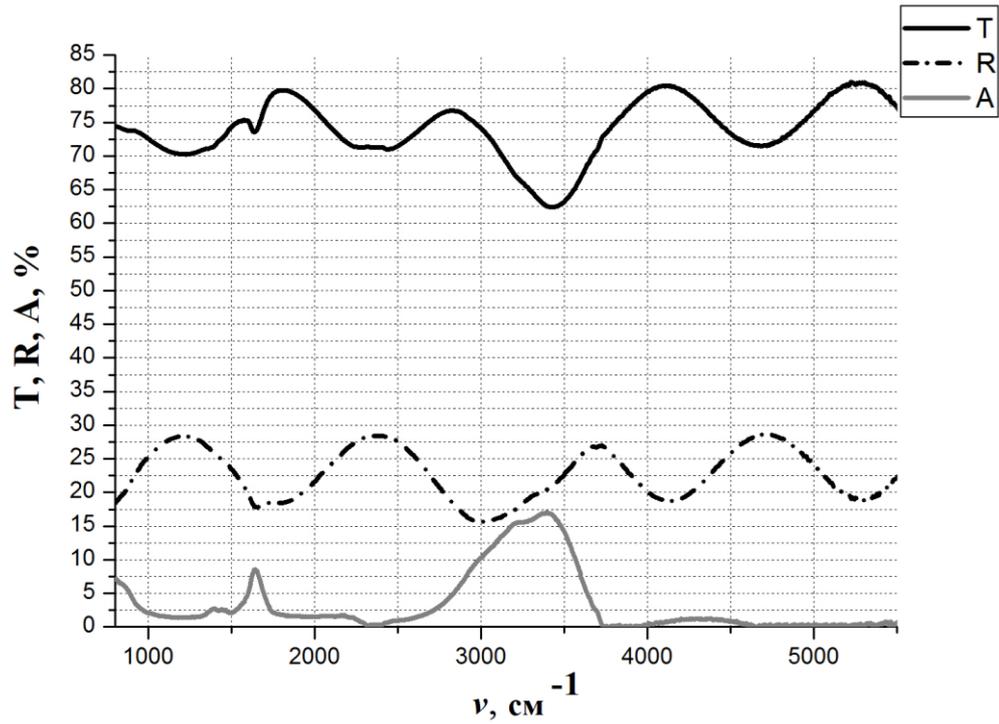
Одними из наиболее широко распространенных пленкообразующих материалов с низким показателем преломления в инфракрасной (ИК) области спектра являются: фторид бария, фторид иттрия, фторид тория, фторид магния и фторид кальция. Все эти материалы имеют ряд недостатков. В связи с этим возникает важная задача – поиск новых пленкообразующих материалов с низким показателем преломления для инфракрасной области спектра. В работах [8, 17] приведены дисперсионные характеристики показателя преломления для пленок фторида бария.

В публикациях [6-7, 60] обсуждаются возможности использования фторидов и бифторидных соединений для получения пленкообразующих материалов с улучшенными оптическими и механическими свойствами. В [6-7] проводились измерения оптических констант пленок непосредственно в процессе их изготовления в вакууме. И были найдены оптические константы пленки на длине волны контроля.

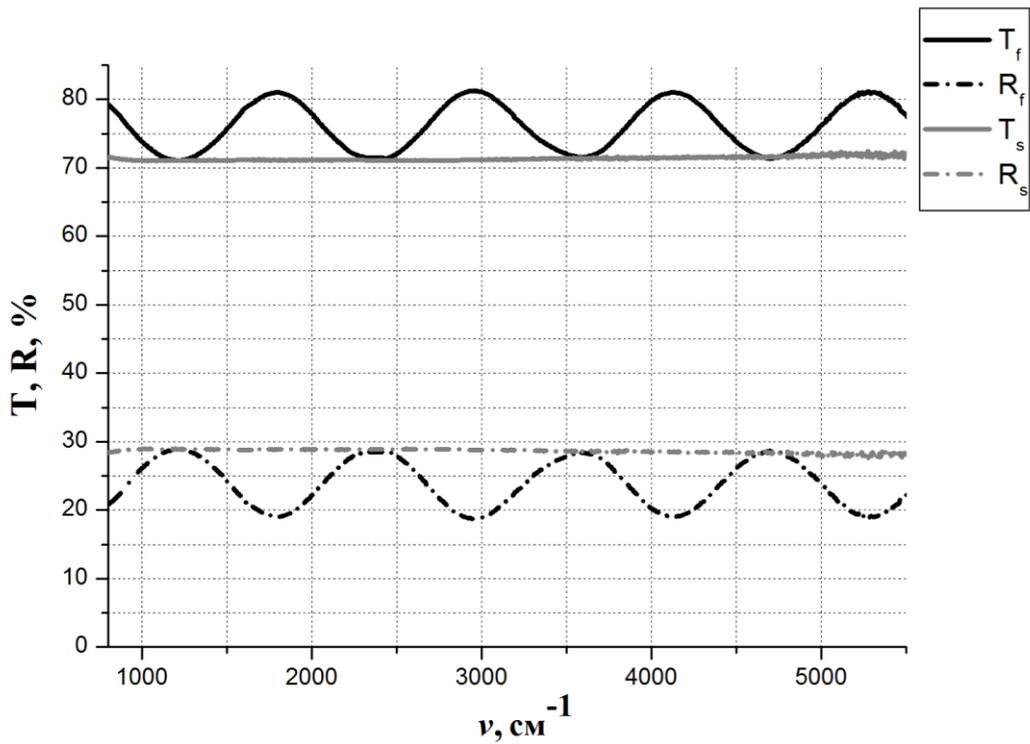
Найденные оптические постоянные пленок в процессе их роста в вакууме не всегда совпадают с величинами, полученными измерением спектральных характеристик на воздухе. Причина этого заключается в том, что структура пленки сложна и содержит поры. Пока пленка не побывала на воздухе в ее порах вакуум и эффективный показатель преломления материала пленки оказывается ниже, чем у монокристаллов.

Толщина пленок составляла  $14\lambda/4$ . В качестве подложек мы использовали ZnSe.

На рис. 2.3.1 приведен пример экспериментальных спектров пропускания  $T$ , отражения  $R$  и поглощения  $A$  пленки  $BaF_2$  на подложке из ZnSe.



**Рис. 2.3.1.** Экспериментальные спектральные характеристики пленки  $\text{BaF}_2$  на подложке из  $\text{ZnSe}$



**Рис. 2.3.2.** Спектральные характеристики пленки  $\text{BaF}_2$  после коррекции поглощения на подложке из  $\text{ZnSe}$

Из рис. 2.3.1 видно, что спектр поглощения имеет характерные полосы поглощения в ряде областей, отсутствующих в монокристаллах. Пики поглощения в областях 2.7-3.0 мкм и 5.8-6.3 мкм вызваны [3-7,16] колебаниями молекул паров  $H_2O$ , молекул воды, адсорбированных в порах пленки, а также гидроксильных групп  $OH^-$ , связанных с ионами бария. Поглощение в области выше 10 мкм связано с фундаментальным поглощением ионов решетки.

На рис. 2.3.2 представлены скорректированные спектры  $BaF_2$ , полученные по нашей методике, описанной в разделе 1.5 с использованием формул (1.5.12), в котором отсутствует поглощение в пленке. Из рис. 2.3.2 видно, что спектральная характеристика, соответствует спектру непоглощающей пленки на поверхности подложки из селенида цинка со слабо меняющимся периодом и амплитудой. Их изменения задается только дисперсией показателя преломления.

Пропускание подложки селенида цинка равнялось 71%, а отражение – 29%. Эти значения с точностью до 0.002 совпадают с пропусканием подложки с пленкой, скорректированной на поглощение, при толщине пленки кратной  $\lambda/2$ . Тем самым подтверждается корректность предложенного метода.

Используя данные, представленные на рис. 2.3.2 находились дисперсионные зависимости для фторида бария ( $BaF_2$ ) на подложке из  $ZnSe$ , которые изображены на рис. 2.3.3.

Для этого использовалась разработанная программа обработки спектров пропускания и отражения, описанная в 1 главе в разделе 1.6. После обработки спектров выяснилось, что в большей части спектра имеется нормальная дисперсия, как в монокристаллах. Отличием является дополнительная дисперсия показателя преломления  $n$  в области полос поглощения пленок (2.7-3.3 мкм и 5.5-7.0 мкм). Дисперсия коррелирует с дополнительными полосами поглощения в указанных областях.

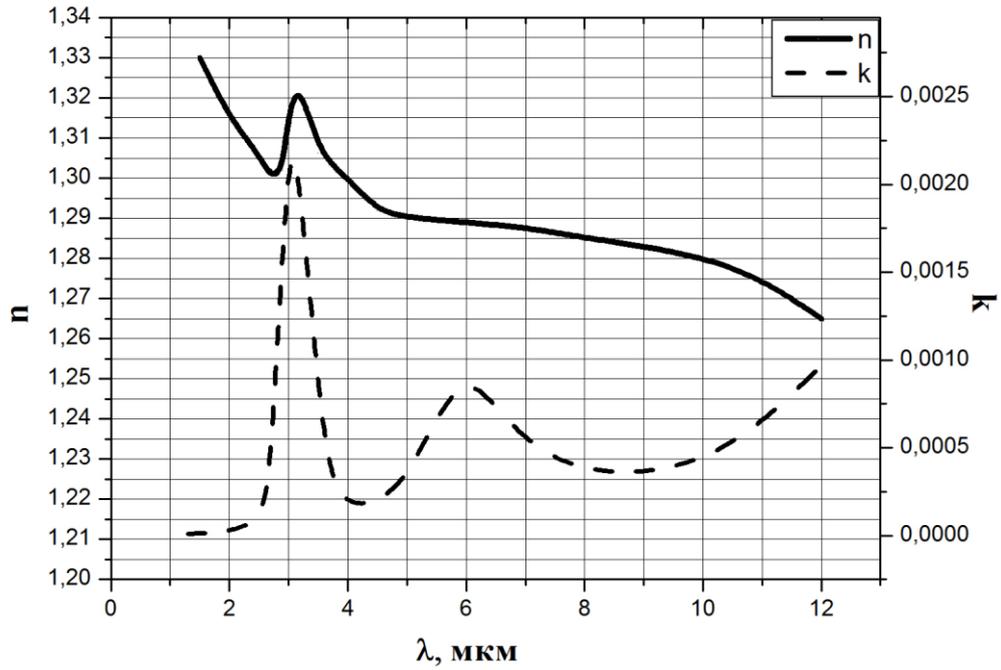
Наличие сильных полос поглощения затрудняет использование пленок  $BaF_2$  для изготовления широкополосных просветляющих покрытий. Нами были

проведены экспериментальные исследования пленок  $\text{BaF}_2$  легированных  $\text{CaF}_2$  или  $\text{MgF}_2$ .

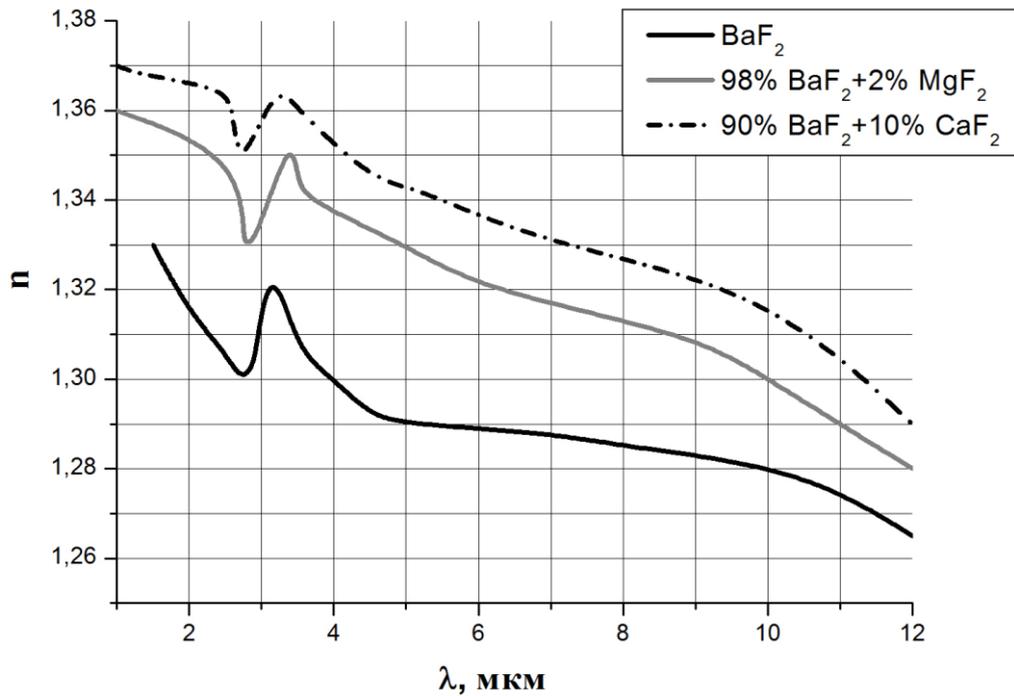
В работах [6-7, 60-61] было установлено, что при добавлении фторида магния  $\text{MgF}_2$  1÷2% весовой концентрации рассеивание снижается в 5 раз и практически одинаково при этих концентрациях. Меньшая добавка  $\text{MgF}_2$  увеличивает рассеивание. Большая добавка  $\text{MgF}_2$ , хотя и несколько снижает рассеивание, приводит к увеличению напряжения в пленке и к появлению дефектов пленок в виде островков на подложке, на которых пленка практически не растет. Диаметр очагов 0.1÷0.3 мм, а их число растет при росте концентрации фторида магния. Коэффициент аккомодации снижается в 3-5 раз при использовании 2% примеси  $\text{MgF}_2$ . При дальнейшем увеличении процентного содержания  $\text{MgF}_2$  в пленках  $\text{BaF}_2$  напряжение в пленках достигает критического значения, и в результате покрытие разрушается. Интерференционные покрытия с концентрацией фторида магния более 4% разрушались уже в процессе изготовления. Такие же результаты получаются при добавлении  $\text{CaF}_2$ . Однако границы его оптимальной концентрации несколько другие и составляют 3÷10%. Оптимальными концентрациями примесей к  $\text{BaF}_2$  являются 1÷2% для  $\text{MgF}_2$  и 3÷10% для  $\text{CaF}_2$ .

На рис. 2.3.4 и рис. 2.3.5 приведены зависимости показателей преломления ( $n$ ) и поглощения ( $k$ ) от длины волны ( $\lambda$ ) на подложках из  $\text{ZnSe}$  марки SVD для пленок  $\text{BaF}_2$ , 98% $\text{BaF}_2$ +2% $\text{MgF}_2$ , 90% $\text{BaF}_2$ +10% $\text{CaF}_2$ .

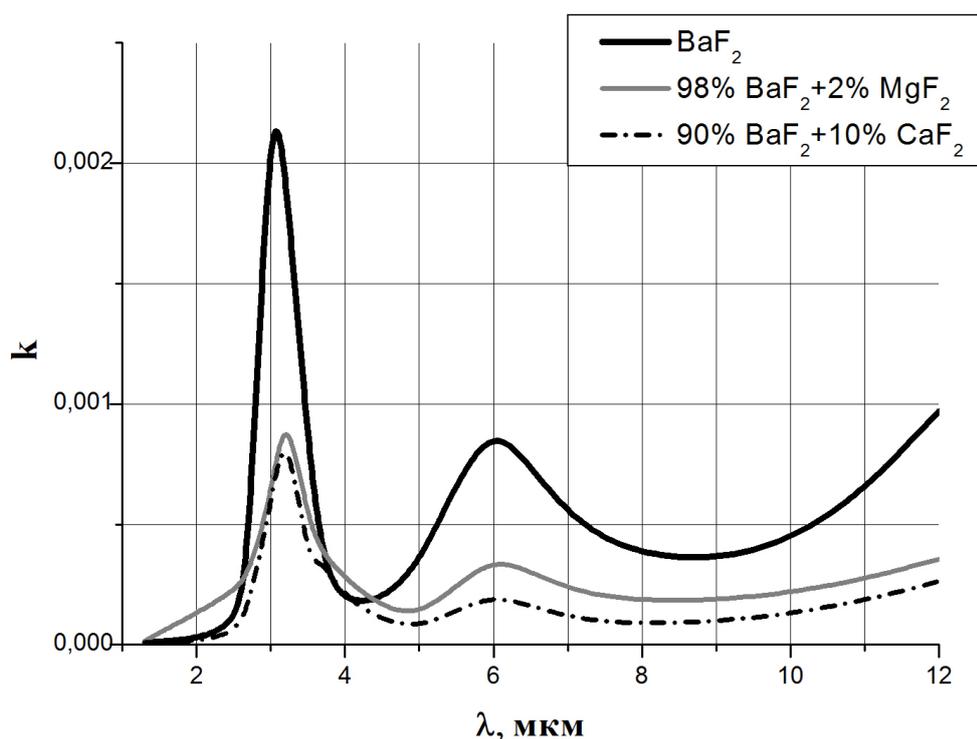
Проведенные экспериментальные исследования показали, что наиболее перспективными для использования в оптических интерференционных покрытиях в средней ИК области спектра являются пленки состава 90%  $\text{BaF}_2$ +10%  $\text{CaF}_2$  и 98%  $\text{BaF}_2$ +2%  $\text{MgF}_2$ , которые имеют меньшее поглощение, чем пленки из чистого фторида бария [62]. Эти пленки (90% $\text{BaF}_2$ +10% $\text{CaF}_2$  и 98% $\text{BaF}_2$ +2% $\text{MgF}_2$ ) по сравнению с пленками чистых фторидов и чистого  $\text{BaF}_2$  обладают повышенными оптическими и эксплуатационными характеристиками.



**Рис. 2.3.3.** Дисперсионные зависимости для фторида бария ( $\text{BaF}_2$ ) на подложке из ZnSe



**Рис. 2.3.4.** Зависимости показателя преломления ( $n$ ) от длины волны ( $\lambda$ ) пленок  $\text{BaF}_2$ , 98%  $\text{BaF}_2$  + 2%  $\text{MgF}_2$ , 90%  $\text{BaF}_2$  + 10%  $\text{CaF}_2$  на подложках из ZnSe



**Рис. 2.3.5.** Зависимости показателя поглощения ( $k$ ) от длины волны ( $\lambda$ ) пленок  $\text{BaF}_2$ ,  $98\% \text{BaF}_2 + 2\% \text{MgF}_2$ ,  $90\% \text{BaF}_2 + 10\% \text{CaF}_2$  на подложках из  $\text{ZnSe}$

Из рис. 2.3.4 и рис. 2.3.5 видно, что пленки двойных фторидов (бифторидов) имеют меньшее поглощение.

Были получены дисперсионные зависимости показателей преломления и поглощения пленок в диапазоне 2 - 12 мкм. Впервые наблюдалось наличие дополнительной дисперсии пленок в областях поглощения, отсутствующих в монокристаллах.

#### **2.4. Оптические константы пленок на основе фторида иттрия**

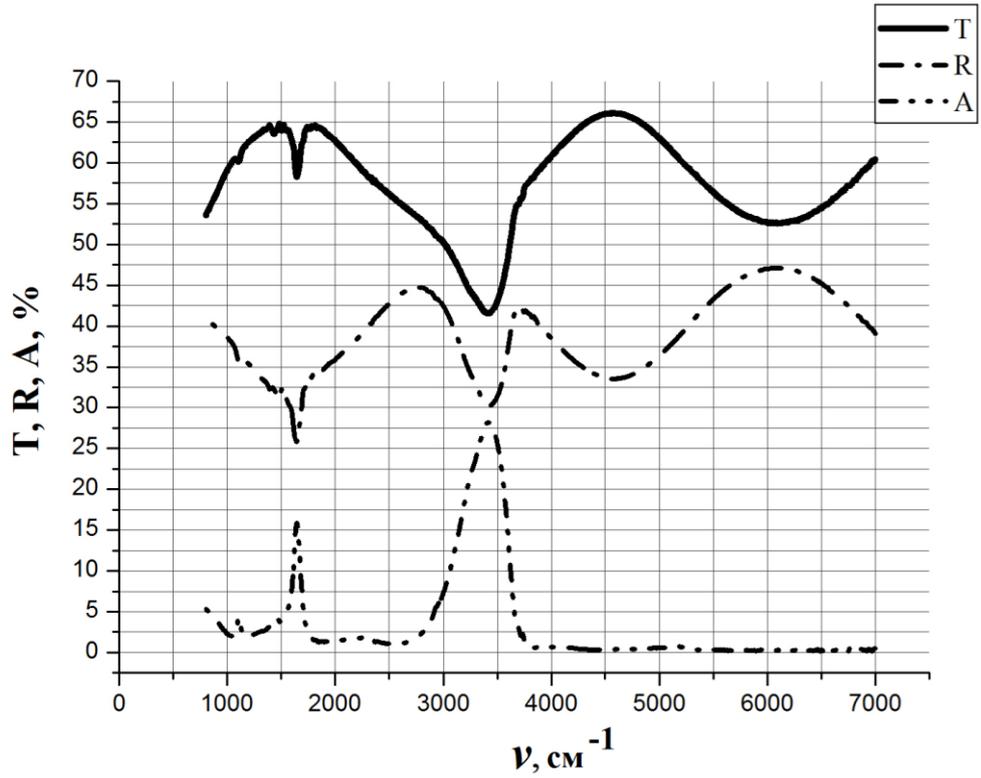
Пленки фторидов, полученные методом вакуумного осаждения, давно являются предметом многочисленных исследований [1-8]. Они обладают высокой прозрачностью в широкой области спектра, не имеют альтернативы, как пленки с низким показателем преломления, при использовании в средней ИК области

спектра. Фториды принадлежат к классу материалов, которые легко испаряются и конденсируются, сохраняя стехиометрию. В связи с этим они получили широкое распространение в качестве пленкообразующих материалов с минимальным показателем преломления.

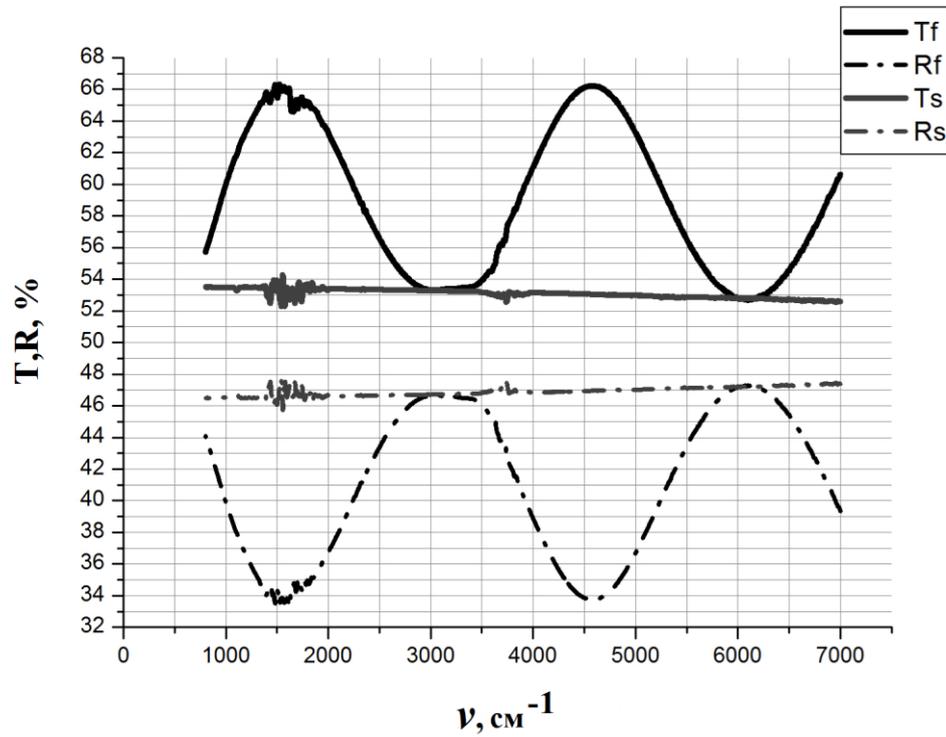
Именно фториды чаще всего входят в состав оптических элементов на основе многослойных интерференционных покрытий, и особенно, в состав просветляющих покрытий. Пленкам фторида иттрия уделено недостаточное внимание в литературе [15-16], в отличие от пленок других фторидов. В настоящей работе мы исследовали зависимости показателей преломления ( $n$ ), поглощения ( $k$ ) от длины волны ( $\lambda$ ) пленок чистого фторида иттрия ( $YF_3$ ) и бифторидов иттрия ( $Y_xMe_{1-x}F_{2+x}$ ), где в качестве Me (металлов) использовались барий или кальций в диапазоне от 2 до 12 мкм. Достоинства исследуемой пленки  $YF_3$  – это высокая прозрачность в видимом и инфракрасном диапазонах спектра, негигроскопичность и высокая механическая прочность; недостатки - высокое напряжение и пористость, поэтому исследование проводилось на подложках из кремния (Si), у которого термический коэффициент расширения близок к фториду иттрия ( $YF_3$ ). Хорошая адгезия пленок к кремнию позволила изготавливать пленки без разрушения при контакте с воздухом вплоть до толщин 1-2 мкм. Свойства исследуемых пленок ( $YF_3$ ) сходны со свойствами фторида магния ( $MgF_2$ ) и так же разрушаются при толщинах свыше 1 – 2 мкм, поэтому при исследовании пленок чистого фторида иттрия их толщина бралась 2 мкм. Толщина бифторидов соответствовала 3.5 мкм. Все пленки изготавливались по методике, описанной в разделе 2.1.

На рис. 2.4.1 приведен экспериментальный спектр фторида иттрия ( $YF_3$ ).

На рис. 2.4.2 представлены спектральные характеристики пленки  $YF_3$  после коррекции поглощения на подложке из Si по нашей методике, описанной в разделе 1.5 по формуле (1.5.18), в которой отсутствует поглощение в пленке ( $T_f, R_f$ ). На этом же рисунке приведены значения спектров подложки из кремния ( $T_s, R_s$ ), скорректированных на поглощение в них.



**Рис. 2.4.1.** Экспериментальные спектральные характеристики пленки фторида иттрия ( $\text{YF}_3$ ) на подложке из кремния (Si)

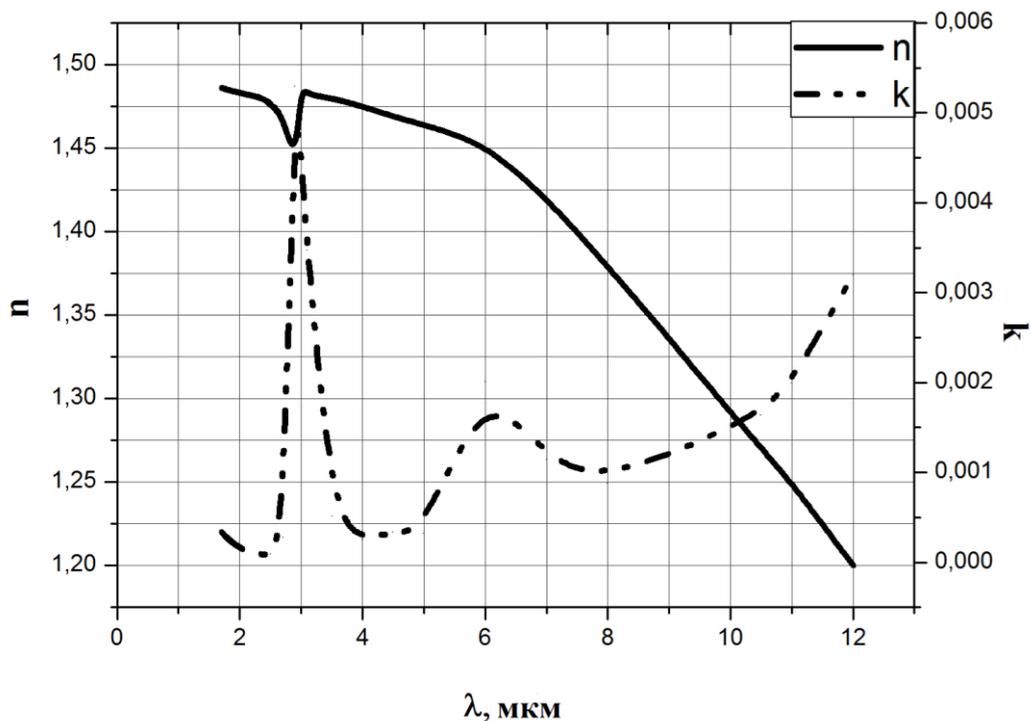


**Рис. 2.4.2.** Спектральные характеристики пленки фторида иттрия ( $\text{YF}_3$ ) после коррекции на подложке из кремния (Si)

Из рис. 2.4.2 видно, что в точках, соответствующих пленкам с полуволновой толщиной, значения спектров совпадают, тем самым подтверждается корректность разработанного метода.

Небольшое отличие от спектров с нулевым поглощением ( $A=0$ ) и такой же дисперсией пленок и подложек связано с тем, что метод не включает поправки более высоких порядков малости, которые по численным оценкам не превосходит 0.005 при поглощении  $A = 10\%$  в системе «пленка-подложка».

Используя данные, приведенные на рис. 2.4.2 с помощью программного обеспечения, представленного в 1 главе в разделе 1.6, мы рассчитали дисперсионные зависимости показателей преломления и поглощения от длины волны для фторида иттрия ( $YF_3$ ), которые приведены на рис. 2.4.3.



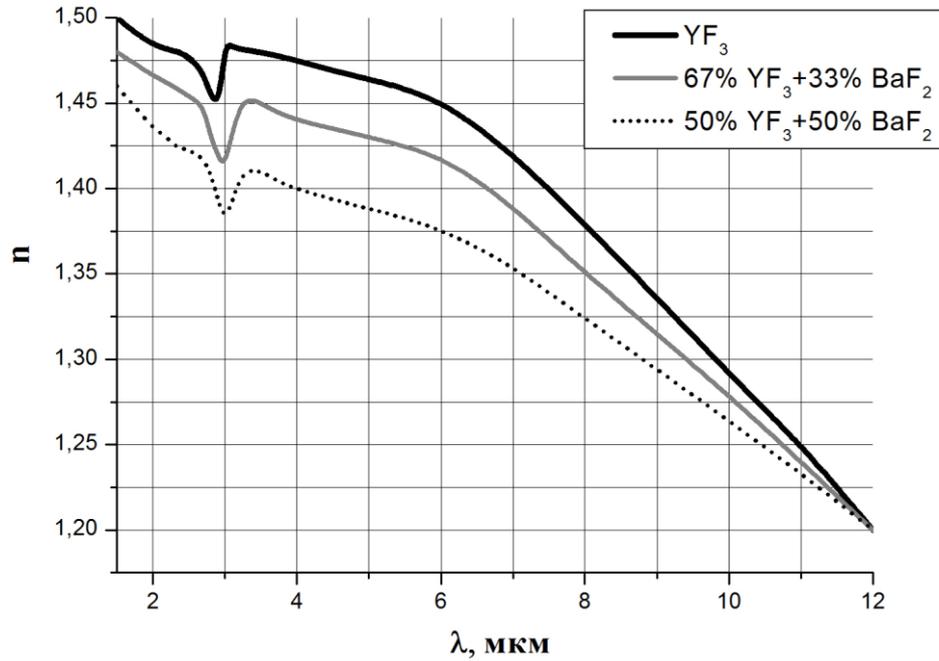
**Рис.2.4.3.** Дисперсионные зависимости фторида иттрия ( $YF_3$ ) на подложке из кремния (Si)

Из рис. 2.4.3 видно, что пленка  $YF_3$  имеет две сильные полосы поглощения: в областях 2.8-3  $\mu\text{m}$  и 5.5-7  $\mu\text{m}$ , которые связаны с внедрением в поры пленки паров воды [63]. Так же, как и в случае с пленками фторида бария наблюдается

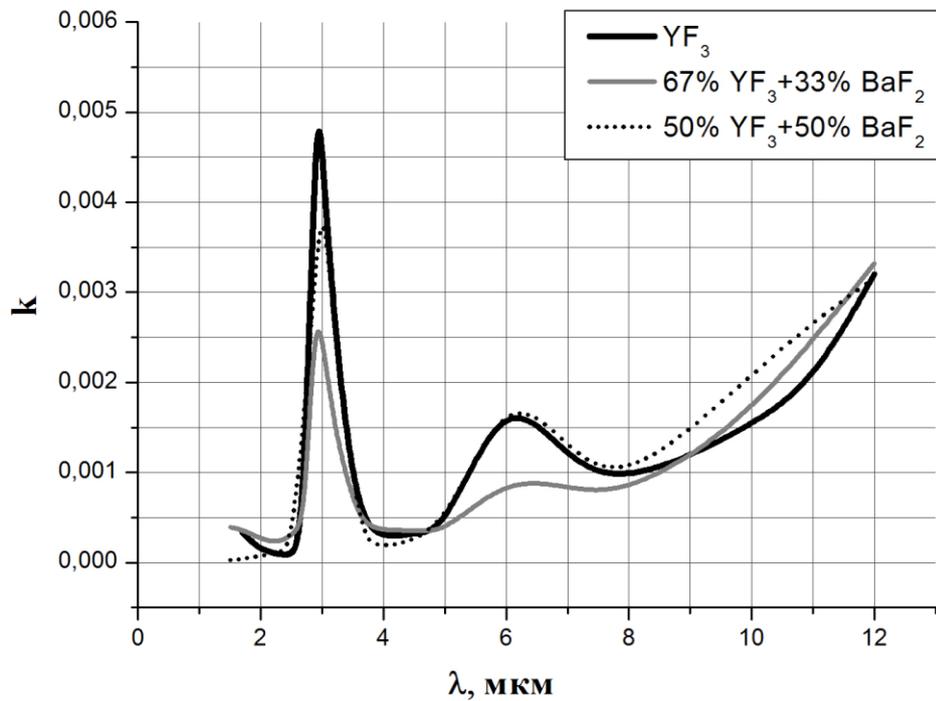
дисперсионная зависимость в области сильных полос поглощения. Видно, что в области спектра от 8 мкм до 12 мкм показатель поглощения монотонно возрастает. Тем не менее, их можно использовать в многослойных интерференционных системах вплоть до 12 мкм. Пленки  $\text{YF}_3$  обладают высоким напряжением, что не позволило их использовать при суммарных толщинах в покрытии, большем 1-2 мкм. Толщина наших пленок  $\text{YF}_3$  составляла 2 мкм, при увеличении их толщин наблюдалось появления трещин на покрытии, что затрудняло их использование в инфракрасном диапазоне спектра.

Были исследованы пленки, состоящие из смесей  $\text{YF}_3$  и  $\text{BaF}_2$ . Процентная доля  $\text{BaF}_2$  – 0, 9, 17, 23, 28, 30, 33, 50 и 100 [52-53, 55-56, 62]. Исследования показали, что пленки фторида иттрия с добавлением фторида бария до 17% имели высокие напряжения, так же как и чистый фторид иттрия и «облезали» в процессе напыления в вакууме. Пленки фторида иттрия легированные фторидом бария от 17% до 30% получались толщиной  $14\lambda/4$ , но «облезали» в течение трех дней. Оптимальный вариант получался для смеси от 30% до 50% фторида бария. Эти пленки были стабильны во времени. Они проверялись на механические свойства: адгезию, влагостойкость и напряжение в них. Адгезия проверялась методом отрыва пленки скотчем [64]. Влагостойкость пленок проверялась путем опускания в холодную воду или выдержкой в атмосфере 90% влажности. Считается, что такое тестирование гарантирует работоспособность пленки в течение нескольких лет при обычных условиях. Все эти испытания показали полную работоспособность исследуемых пленок. Легирование фторида иттрия ( $\text{YF}_3$ ) свыше 50% фторидом бария ( $\text{BaF}_2$ ) не прошел тест на влагостойкость.

На рис. 2.4.4 и рис. 2.4.5 приведены зависимости показателей преломления ( $n$ ), поглощения ( $k$ ) от длины волны ( $\lambda$ ) на подложках из Si марки КЭФ-5 для пленок  $\text{YF}_3$ , 67%  $\text{YF}_3+33\%$   $\text{BaF}_2$  и 50%  $\text{YF}_3+50\%$   $\text{BaF}_2$ . Из рис. 2.4.4 видно, что наибольший показатель преломления имеет пленка чистого фторида иттрия, толщина которой  $8\lambda/4$ .



**Рис. 2.4.4.** Зависимости показателя преломления ( $n$ ) от длины волны ( $\lambda$ ) пленок  $\text{YF}_3$ , 67%  $\text{YF}_3$ +33%  $\text{BaF}_2$  и 50% $\text{YF}_3$ +50%  $\text{BaF}_2$  на подложках из кремния (Si)



**Рис. 2.4.5.** Зависимости показателя поглощения ( $k$ ) от длины волны ( $\lambda$ ) пленок  $\text{YF}_3$ , 67%  $\text{YF}_3$ +33%  $\text{BaF}_2$  и 50% $\text{YF}_3$ +50%  $\text{BaF}_2$  на подложках из кремния (Si)

Из рис. 2.4.5 видно, что поглощение в пленке 67% YF<sub>3</sub>+33% BaF<sub>2</sub> на длинах волн 3 мкм и 6 мкм, т.е. в области поглощения водой в порах пленки, минимально.

Исследования показали, что в этом диапазоне данный бифторид (67% YF<sub>3</sub>+33% BaF<sub>2</sub>) является перспективным пленкообразующим материалом. В отличие от известных фторидов и чистого фторида иттрия он не имеет сильных полос поглощения, негигроскопичен, обладает хорошими механическими свойствами и может быть использован в составе сложного покрытия в средней ИК области спектра.

## **2.5. Сводные результаты по оптическим константам**

В таблице 2.5.1 приведены значения полученных оптических констант исследованных пленок на подложках из кремния (Si) и селенида цинка (ZnSe), т.е. определены показатели преломления ( $n$ ) и поглощения ( $k$ ).

В таблице 2.5.2 приведены оптические константы пленкообразующих материалов на основе фторида бария. Пленки фторида магния (MgF<sub>2</sub>) не исследовались отдельно, так как они обладают высокими растягивающимися напряжениями и редко используются в ИК области спектра, кроме того их длинноволновая область спектра составляет 5 - 6 мкм [65].

Для исследуемых пленок находилась относительная плотность  $q$ , которая определяется соотношением плотности пленки  $p_f$  к плотности массивного образца  $p_m$  (монокристалла). Относительная плотность (коэффициент упаковки /коэффициент заполнения) связана с показателем преломления массивного образца и пленки соотношением [4]:

$$q = \frac{p_f}{p_m} = \frac{(n_f^2 - 1)(n_m^2 + 2)}{(n_f^2 + 2)(n_m^2 - 1)} \quad (2.5.1)$$

где  $n_f$  и  $n_m$  – показатели преломления пленки и массивного образца, т.е. монокристалла соответственно.

Таблица 2.5.1. Оптические константы исследованных пленок

Длина волны, мкм	Материалы / подложка					
	YF <sub>3</sub> / Si		BaF <sub>2</sub> / ZnSe		CaF <sub>2</sub> / Si	
1	2		3		4	
	<i>n</i>	<i>k</i>	<i>n</i>	<i>k</i>	<i>n</i>	<i>k</i>
1.5	1.500	0.445·10 <sup>-3</sup>	1.330	0.012·10 <sup>-3</sup>	1.252	0.041·10 <sup>-3</sup>
2.0	1.485	0.125·10 <sup>-3</sup>	1.311	0.041·10 <sup>-3</sup>	1.247	0.163·10 <sup>-3</sup>
2.5	1.475	0.135·10 <sup>-3</sup>	1.305	0.121·10 <sup>-3</sup>	1.243	0.186·10 <sup>-3</sup>
2.7	1.463	1.645·10 <sup>-3</sup>	1.302	0.463·10 <sup>-3</sup>	1.238	0.512·10 <sup>-3</sup>
2.9	1.465	4.721·10 <sup>-3</sup>	1.306	1.502·10 <sup>-3</sup>	1.242	1.567·10 <sup>-3</sup>
3.0	1.478	4.722·10 <sup>-3</sup>	1.314	1.750·10 <sup>-3</sup>	1.244	1.719·10 <sup>-3</sup>
3.2	1.483	2.245·10 <sup>-3</sup>	1.321	2.082·10 <sup>-3</sup>	1.247	1.477·10 <sup>-3</sup>
3.5	1.478	0.745·10 <sup>-3</sup>	1.309	0.931·10 <sup>-3</sup>	1.245	0.526·10 <sup>-3</sup>
4.0	1.475	0.300·10 <sup>-3</sup>	1.300	0.222·10 <sup>-3</sup>	1.237	0.143·10 <sup>-3</sup>
4.5	1.465	0.323·10 <sup>-3</sup>	1.293	0.224·10 <sup>-3</sup>	1.226	0.115·10 <sup>-3</sup>
5	1.464	0.506·10 <sup>-3</sup>	1.291	0.435·10 <sup>-3</sup>	1.220	0.138·10 <sup>-3</sup>
6	1.450	1.604·10 <sup>-3</sup>	1.288	0.932·10 <sup>-3</sup>	1.213	0.257·10 <sup>-3</sup>
7	1.418	1.254·10 <sup>-3</sup>	1.287	0.561·10 <sup>-3</sup>	1.200	0.221·10 <sup>-3</sup>
8	1.380	1.000·10 <sup>-3</sup>	1.285	0.463·10 <sup>-3</sup>	1.186	0.194·10 <sup>-3</sup>
10.5	1.267	1.725·10 <sup>-3</sup>	1.27	0.544·10 <sup>-3</sup>	1.130	0.243·10 <sup>-3</sup>
12	1.203	3.221·10 <sup>-3</sup>	1.265	0.978·10 <sup>-3</sup>	1.119	0.457·10 <sup>-3</sup>

В таблице 2.5.3 приведены результаты расчета относительной плотности пленок на подложках ZnSe и Si.

Из таблиц 2.5.1 - 2.5.3 видно, что пленки двойных фторидов (бифторидов) имеют меньшее поглощение и большую плотность упаковки по сравнению с пленками чистых фторидов.

В справочниках отсутствуют данные по монокристаллу фторида иттрия. Поэтому мы не смогли рассчитать его относительную плотность и относительную плотность пленкообразующих материалов на его основе.

В качестве пленкообразующих материалов использовались кристаллы BaF<sub>2</sub>, CaF<sub>2</sub> и YF<sub>3</sub>, которые впоследствии являлись основными компонентами бифторидных пленок: 90%BaF<sub>2</sub>+10%CaF<sub>2</sub>, 67% YF<sub>3</sub>+33% CaF<sub>2</sub>, 67% YF<sub>3</sub>+33% BaF<sub>2</sub>, 50% YF<sub>3</sub>+50% BaF<sub>2</sub>.

**Таблица 2.5.2.** Оптические константы пленкообразующих материалов на основе фторида бария

Длина волны, мкм	Материал / Подложка (ZnSe)			
	90% BaF <sub>2</sub> + 10% CaF <sub>2</sub>		98% BaF <sub>2</sub> + 2% MgF <sub>2</sub>	
1	2		3	
	<i>n</i>	<i>k</i>	<i>n</i>	<i>k</i>
2.0	1.367	0.024·10 <sup>-3</sup>	1.354	0.175·10 <sup>-3</sup>
2.5	1.362	0.063·10 <sup>-3</sup>	1.347	0.341·10 <sup>-3</sup>
2.7	1.351	0.201·10 <sup>-3</sup>	1.336	0.382·10 <sup>-3</sup>
2.9	1.354	0.583·10 <sup>-3</sup>	1.351	0.543·10 <sup>-3</sup>
3.0	1.357	0.621·10 <sup>-3</sup>	1.335	0.561·10 <sup>-3</sup>
3.2	1.361	0.841·10 <sup>-3</sup>	1.341	0.874·10 <sup>-3</sup>
3.5	1.362	0.423·10 <sup>-3</sup>	1.350	0.541·10 <sup>-3</sup>
4.0	1.352	0.223·10 <sup>-3</sup>	1.337	0.371·10 <sup>-3</sup>
4.5	1.346	0.121·10 <sup>-3</sup>	1.332	0.192·10 <sup>-3</sup>
5	1.342	0.103·10 <sup>-3</sup>	1.330	0.150·10 <sup>-3</sup>
6	1.337	0.205·10 <sup>-3</sup>	1.321	0.424·10 <sup>-3</sup>
7	1.330	0.132·10 <sup>-3</sup>	1.317	0.313·10 <sup>-3</sup>
8	1.323	0.101·10 <sup>-3</sup>	1.312	0.225·10 <sup>-3</sup>
10.5	1.310	0.178·10 <sup>-3</sup>	1.294	0.353·10 <sup>-3</sup>
12	1.290	0.283·10 <sup>-3</sup>	1.280	0.445·10 <sup>-3</sup>

**Таблица 2.5.3.** Относительная плотность исследуемых пленок

Пленки	Материал / Подложка			
	BaF <sub>2</sub> / ZnSe	CaF <sub>2</sub> / Si	98%BaF <sub>2</sub> +2%MgF <sub>2</sub> / ZnSe	90%BaF <sub>2</sub> +10%CaF <sub>2</sub> / ZnSe
1	2	3	4	5
Относительная плотность ( <i>q</i> )	0.743	0.621	0.783	0.806

В таблице 2.5.4 приведены оптические константы пленкообразующих материалов на основе фторида иттрия.

Ниже приведена сравнительная таблица 2.5.5 оптических постоянных монокристаллов и пленок фторидов, полученных различными методами. Таблица составлена по данным отечественных и зарубежных работ.

**Таблица 2.5.4.** Оптические константы пленкообразующих материалов на основе фторида иттрия

Длина волны, мкм	Материал / Подложка (Si)					
	67% YF <sub>3</sub> + 33% BaF <sub>2</sub>		50% YF <sub>3</sub> + 50% BaF <sub>2</sub>		67% YF <sub>3</sub> + 33% CaF <sub>2</sub>	
<b>1</b>	<b>2</b>		<b>3</b>		<b>4</b>	
	<i>n</i>	<i>k</i>	<i>n</i>	<i>k</i>	<i>n</i>	<i>k</i>
1.5	1.480	0.400·10 <sup>-3</sup>	1.461	0.030·10 <sup>-3</sup>	1.44	0.641·10 <sup>-3</sup>
2.0	1.468	0.302·10 <sup>-3</sup>	1.435	0.101·10 <sup>-3</sup>	1.42	0.582·10 <sup>-3</sup>
2.5	1.456	0.345·10 <sup>-3</sup>	1.423	0.344·10 <sup>-3</sup>	1.40	0.422·10 <sup>-3</sup>
2.7	1.435	1.227·10 <sup>-3</sup>	1.415	1.523·10 <sup>-3</sup>	1.395	1.716·10 <sup>-3</sup>
2.9	1.419	2.620·10 <sup>-3</sup>	1.383	3.651·10 <sup>-3</sup>	1.390	3.172·10 <sup>-3</sup>
3.0	1.420	2.509·10 <sup>-3</sup>	1.384	3.705·10 <sup>-3</sup>	1.376	3.446·10 <sup>-3</sup>
3.2	1.451	0.401·10 <sup>-3</sup>	1.405	2.245·10 <sup>-3</sup>	1.409	1.042·10 <sup>-3</sup>
3.5	1.447	0.609·10 <sup>-3</sup>	1.408	0.642·10 <sup>-3</sup>	1.400	0.686·10 <sup>-3</sup>
4.0	1.438	0.357·10 <sup>-3</sup>	1.400	0.234·10 <sup>-3</sup>	1.398	0.241·10 <sup>-3</sup>
4.5	1.435	0.391·10 <sup>-3</sup>	1.393	0.287·10 <sup>-3</sup>	1.390	0.332·10 <sup>-3</sup>
5	1.430	0.423·10 <sup>-3</sup>	1.381	0.507·10 <sup>-3</sup>	1.373	0.357·10 <sup>-3</sup>
6	1.415	0.705·10 <sup>-3</sup>	1.375	1.646·10 <sup>-3</sup>	1.367	0.838·10 <sup>-3</sup>
7	1.383	0.705·10 <sup>-3</sup>	1.352	1.307·10 <sup>-3</sup>	1.344	0.803·10 <sup>-3</sup>
8	1.351	0.75·10 <sup>-3</sup>	1.325	1.108·10 <sup>-3</sup>	1.315	0.841·10 <sup>-3</sup>
10.5	1.257	2.185·10 <sup>-3</sup>	1.245	2.445·10 <sup>-3</sup>	1.232	2.711·10 <sup>-3</sup>
12	1.203	3.389·10 <sup>-3</sup>	1.203	3.205·10 <sup>-3</sup>	1.2	3.556·10 <sup>-3</sup>

Оптические постоянные зависят, как от способа получения, так и от технологических режимов: температуры подложки, скорости осаждения, остаточного давления или давления реактивной среды в вакуумной камере и т.д.

Как видно из таблицы 2.5.5, дисперсионные зависимости оптических констант фторидов практически не представлены в литературе. Как правило, приведены либо данные для отдельных точек спектра, либо указаны средние значения для диапазона. Кроме того, в ряде случаев в литературе указаны данные для монокристаллов [13,14], а не для пленок.

**Таблица 2.5.5.** Сравнительная таблица оптических постоянных фторидов

Материал	Длина волны, мкм	[13] крист	[14] крист	[15]	[16]	[8]	[17]	[66]	Наши измерения
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
YF <sub>3</sub>	2.0	-	-	1.478	1.460	-	-	1.495	1.485
	4.5	-	-	1.465	1.458	-	-	1.475	1.465
	10.5	-	-	1.360	1.28	-	-	1.28	1.267
CaF <sub>2</sub>	0.546	-	-	-	-	1.23-1.26	1.23-1.26	-	-
	2.0	1.423	1.422	-	-	-	-	-	1.247
	4.5	1.404	1.405	-	-	-	-	-	1.226
	10.0	-	1.310	-	-	-	-	-	1.138
BaF <sub>2</sub>	0.5	-	-	-	-	-	1.38-1.40	-	-
	2.0	1.464	1.464	-	-	-	-	-	1.284
	4.5	1.453	1.453	-	-	-	-	-	1.272
	10.0	1.400	1.390	-	-	-	-	-	1.258

Данных по бифторидам иттрия и бария в литературе практически нет. Имеется работа [6], где исследовались пленки фторида бария, легированного фторидом магния на длине волны 0.9 мкм. Полученный показатель преломления 1.42 согласуется с нашими результатами. В этой же работе исследовано поглощение этих пленок на длине волны 10.6 мкм. В тех случаях, когда можно сравнивать полученные нами результаты и результаты, приведенные в литературных источниках, они хорошо согласуются между собой.

Так для пленок фторида иттрия, которые интенсивно исследовались в последние годы, наши результаты и литературные данные практически совпадают (см. таблицу 2.5.5). Возможные отличия можно объяснить применением разных методик при анализе пленок и разными условиями их изготовления.

Полученные нами результаты дают возможность синтезировать и изготавливать оптические покрытия с использованием одинарных и двойных фторидов.

Следует отметить, что исследованные достаточно давно пленки фторида кальция требуют особого внимания. Используемые технологии их изготовления на первых этапах не позволяли получать пленки качественного состава. Они имели крупнокристаллическую структуру и невысокие механические свойства [65]. В настоящее время совершенствование технологий напыления позволяет создать пленки высокого качества. Наши исследования показали, что пленки фторида кальция имеют поглощение в средней ИК области, сравнимое с пленками фторида бария. Их преимуществом является негигроскопичность и высокая механическая прочность.

## Заключение

В первой части диссертации описаны исследования оптических констант пленок.

В первой главе проведен обзор спектрофотометрических методов исследования оптических констант пленок.

Рассмотрена математическая модель и методы расчетов спектров пропускания и отражения. Для расчетов спектров выбран матричный метод.

Предложена и рассмотрена методика исследования дисперсионных зависимостей оптических констант (ОК) пленок (показателей преломления и поглощения), базирующаяся на коррекции поглощения в спектрах пропускания и отражения. Эта методика позволяет свести задачу определения оптических констант пленок к известной задаче нахождения ОК непоглощающих пленок. Для реализации этой методики составлена программа на языке Wolfram Mathematica - 8.0.

Во второй главе представлены результаты исследования оптических констант пленок фторидов и бифторидов в диапазоне от 2 мкм до 12 мкм. Для их определения использовалась предложенная нами методика коррекции спектров на поглощении в спектрах пропускания и отражения. Рассчитанные оптические константы дают возможность синтезировать и изготавливать оптические покрытия с использованием одинарных и двойных фторидов.

В качестве подложек использовались селенид цинка (ZnSe) и кремний (Si). Для этих подложек были предварительно определены оптические константы.

Экспериментально доказано, что предложенная методика дает хорошие результаты при определении оптических констант пленок.

Проведены экспериментальные исследования пленок фторидов и двойных фторидов (бифторидов), в результате определены оптические константы исследуемых пленок:  $\text{YF}_3$ ,  $\text{BaF}_2$ ,  $\text{CaF}_2$ ,  $98\% \text{BaF}_2 + 2\% \text{MgF}_2$ ,  $90\% \text{BaF}_2 + 10\% \text{CaF}_2$ ,  $67\% \text{YF}_3 + 33\% \text{BaF}_2$ ,  $50\% \text{YF}_3 + 50\% \text{BaF}_2$  и  $67\% \text{YF}_3 + 33\% \text{CaF}_2$ .

Определена относительная плотность пленок  $\text{BaF}_2$ ,  $\text{CaF}_2$ ,  $98\% \text{BaF}_2 + 2\% \text{MgF}_2$ ,  $90\% \text{BaF}_2 + 10\% \text{CaF}_2$ .

Приведены сводные результаты по оптическим константам пленок фторидов и бифторидов в средней ИК области спектра. В научной литературе по фторидам в средней ИК области спектра дисперсионные характеристики практически не представлены, имеются данные для отдельных точек спектра или указаны средние значения для среднего диапазона. Данные по бифторидам впервые рассчитаны автором диссертационной работы.

Исследования, проведенные для данной диссертационной работы, показали, что пленки фторида кальция имеют поглощение в средней ИК области спектра, сравнимое с пленками фторида бария. Однако пленки фторида кальция обладают преимуществом, таким как негигроскопичность и высокая механическая прочность, поэтому их следует использовать в качестве пленкообразующих материалов.

Оригинальная методика коррекции спектров позволила впервые наблюдать наличие дополнительной дисперсии пленок в областях поглощения (3 мкм и 6 мкм), отсутствующих в монокристаллах.

В работе проведен сравнительный анализ, как известных фторидов, так и перспективных материалов бифторидов в средней ИК области спектра и выявлены наиболее перспективные пленкообразующие материалы ( $98\% \text{BaF}_2 + 2\% \text{MgF}_2$  и  $67\% \text{YF}_3 + 33\% \text{BaF}_2$ ). Эти материалы в отличие от известных фторидов не имеют сильных полос поглощения, негигроскопичны, обладают хорошими механическими свойствами и могут быть использованы в составе сложного покрытия в средней ИК области спектра, например, при синтезе ахроматических просветляющих покрытий, которым требуются прозрачные оптические пленки с различными показателями преломления и малым поглощением в указанной области спектра.

## **ЧАСТЬ 2. СИНТЕЗ АХРОМАТИЧЕСКИХ ПРОСВЕТЛЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ**

### **Введение**

Научно-технический прогресс активизировал дальнейшее развитие физической оптики, и в частности, совершенствование оптоэлектроники и квантовой электроники, оптического приборостроения, спектроскопии и голографии. Развитие оптического приборостроения невозможно без новейших интерференционных покрытий. Поэтому перед современной физической оптикой стоит ряд проблем, которые необходимо учитывать при выборе направлений дальнейшего развития теории синтеза, которая включает особенности теории интерференционных покрытий и требования к их практической реализации. Главная задача синтеза состоит в создании конструктивных покрытий с требуемыми оптическими характеристиками устойчивыми к ошибкам в оптических параметрах слоев, к сожалению, неизбежными в процессе производства.

Разработку интерференционных покрытий (ИП) можно условно разделить на два этапа: конструирование и практическую реализацию. На первом этапе - конструирования решается задача синтеза ИП, которая заключается в определении конструкции покрытия, обеспечивающей получение требуемых спектральных характеристик. Под конструкцией ИП подразумевается число слоев покрытия, толщины этих слоев и их показатели преломления. На втором этапе решается задача практической реализации синтезированных покрытий. При изготовлении и проектировании ИП, с одной стороны, необходимо учитывать наличие пленкообразующих материалов с нужными оптическими и эксплуатационными свойствами, а с другой - особенности оборудования и контрольно-измерительных приборов, используемых в процессе производства. После получения реализуемой на практике структуры покрытия необходима

определенная технологическая проработка её, а также, проведение дополнительных расчетов, т.е. анализ устойчивости, с целью корректировки первоначальной структуры. Итак, в ходе решения задачи синтеза ИП используется также анализ ИП, который заключается в расчете оптических характеристик покрытий с известной конструкцией. Синтез и анализ являются частями одной общей задачи – проектирования покрытий.

В процессе разработки интерференционных покрытий решаются три задачи: синтеза [1-5], анализа устойчивости системы к ошибкам в толщинах слоев [6-11] и выбор технологических аспектов изготовления интерференционных покрытий [11-12]. Задача синтеза состоит из определения конструкции покрытия с заданной точностью, обеспечивающей получение требуемых спектральных характеристик. В общем случае, задача синтеза покрытий принадлежит к классу некорректно поставленных [1-5]. Поэтому, как правило, решению подобного рода задач удовлетворяют несколько комбинаций. Отсюда и вытекает задача анализа найденных решений с точки зрения их устойчивости по отношению к различным ошибкам, неизбежным в процессе реализации.

В работе проведен сравнительный анализ методик определения устойчивости спектральных характеристик многослойных диэлектрических систем к возможным изменениям оптической толщины отдельных слоев. Предложена методика, в основе которой лежит введенный критерий устойчивости синтезированных интерференционных покрытий, позволяющий исследовать трансформацию спектров при реальных ошибках в толщинах пленок. Разработано программное обеспечение для анализа устойчивости интерференционных покрытий. На примерах некоторых типов интерференционных покрытий проиллюстрирован сравнительный анализ известных и предложенной методики.

## ГЛАВА 3. МЕТОДЫ СИНТЕЗА ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ

### 3.1. Обзор методов синтеза интерференционных покрытий

В данной работе разрабатываются методики решения задачи синтеза ахроматических просветляющих покрытий (ПП) для инфракрасного диапазона спектра. Задача этой работы, несмотря на обширность класса ПП, является частной, но решаем её исходя из общих позиций. Этот подход позволяет сформировать универсальные и эффективные методы синтеза ПП, которые в дальнейшем можно применить и к другим классам интерференционных покрытий (ИП).

Решение задачи синтеза ИП в общем виде сопряжено со значительными трудностями, поэтому имеется большое количество различных методов синтеза, ориентированных на решение частных задач. Универсального метода синтеза покрытий не существует.

С точки зрения используемых математических методов, методы синтеза ИП можно разделить на две группы:

- аналитические методы синтеза ИП [2, 44, 67-71] представляют собой последовательность вычислительных операций, аналогичных анализу ИП, выполнение которых позволяет либо найти решение, либо убедиться в его отсутствии для рассматриваемого типа покрытий;

- численные методы [72-83] оптимизации характеристик покрытия – это методы, позволяющие минимизировать функцию качества.

Рассмотрим подробнее каждую из перечисленных групп методов.

#### **3.1.1. Аналитические методы синтеза**

К аналитическим методам синтеза относятся методы, при которых выбор с помощью аналитических выражений показателей преломления многослойной

системы позволяет приблизиться к заданной спектральной характеристике покрытия. Для упрощения задачи обычно полагают, что покрытие состоит из непоглощающих слоев равной оптической толщины. Задача синтеза в этом случае заключается в определении показателей преломления слоев.

Один из возможных подходов к проблеме синтеза – синтез путем анализа с помощью матричного и адмиттансного методов, базирующихся на описании свойств пленочной системы, которые описаны в работах [2, 39, 43, 45], рассмотренных в 1 главе (раздел 1.2.3 и 1.2.4).

Следующая группа методов основана на аппроксимации спектральной характеристики покрытия различными полиномами, которые подгоняют под требуемую характеристику [67]. При этом коэффициенты полиномов выражаются через показатели преломления слоев и окружающих сред. Для реализации данной задачи используется покрытие, состоящее из непоглощающих слоев равной оптической толщины. Задача синтеза в этом случае заключается в определении показателей преломления слоев, позволяющих приблизиться к заданной спектральной характеристике.

Принцип выбора показателей преломления плёнообразующих материалов для двухслойной просветляющей системы из четвертьволновых пленок определяется методом диаграмм Шустера, на которых отображены области возможных пар значений показателей преломления слоев. Этот метод получил развитие в работе [84].

К аналитическим методам синтеза покрытий относится матричный метод расчета спектральных характеристик П.Г. Карда [44]. При некоторых приближениях он позволяет получить удобные для задачи синтеза математические выражения, которые используются при решении ряда задач по конструированию широкополосных просветляющих и светоделительных покрытий с небольшим числом слоев. Свойственные методу Карда возможности линеаризации математических выражений, определяющих зависимости

спектральных характеристик от конструктивных параметров покрытия, используются при комбинации метода с методами линейного программирования.

Ярким примером аналитических методов являются методы, основанные на нахождении непрерывного распределения показателя преломления слоев с помощью преобразований Фурье, которые обеспечивают получение заданной спектральной характеристики [2, 71, 83-85]. Эти методы имеют свои достоинства, главное из которых – отсутствие необходимости в нулевом приближении. Недостаток этого класса методов заключается в сложности практической реализации рассчитанных покрытий, а также в их неприменимости для неупрощенного критерия качества.

При решении задачи синтеза удобно использовать методы и приемы, направленные на упрощение математического описания многослойной пленочной системы. Такими методами являются метод эффективных границ и метод эквивалентных слоев.

Метод эффективных границ базируется на анализе модели фильтра Фабри-Перо [2, 45, 88]. Внутри многослойной системы выбираются две соседние границы раздела и применяется формула Фабри-Перо. В результате получаются следующие соотношения:

$$T(\lambda) = T_0 / F(\lambda), \quad (3.1.1)$$

$$\text{где } T_0 = \frac{(1 - R_1(\lambda))(1 - R_2(\lambda))}{(1 - R(\lambda))^2}, \quad F(\lambda) = 1 + \frac{4R_q(\lambda)}{(1 - R_q(\lambda))^2} \sin^2\left(\frac{\varphi_1 + \varphi_2 - \beta}{2}\right),$$

$$\beta = \pi h \lambda_0 / \lambda, \quad R_q(\lambda) = \sqrt{R_1(\lambda)R_2(\lambda)}$$

$T(\lambda)$  - коэффициент пропускания всей многослойной системы;  $R_1(\lambda)$  и  $R_2(\lambda)$  - коэффициенты отражения подсистем 1 и 2 для света, падающего со стороны прослойки между подсистемами;  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  - соответствующие  $R_1(\lambda)$  и  $R_2(\lambda)$  фазовые сдвиги при отражении;  $h$  - оптическая толщина, измеренная в  $\lambda_0/4$ , прослойки между подсистемами 1 и 2;  $\lambda_0$  - масштабная длина волны.

Важная особенность этой формулы состоит в том, что фазовые и амплитудные соотношения можно рассматривать независимо:  $T_0(\lambda)$  зависит только от коэффициентов отражения подсистем,  $F(\lambda)$  зависит в первую очередь от фазовых соотношений при отражении от двух подсистем и от толщины прокладки между ними. Оба эти множителя никогда не превышают единицы. В случае высокой прозрачности ( $T(\lambda) \approx 1$ ) амплитуды должны быть подобраны так, чтобы  $T_0(\lambda) \approx 1$ , а фазы – так чтобы  $F(\lambda) \approx 1$ .

Из формулы (3.1.1) следует, что:

$$T_0(\lambda) = 1 \text{ при } R_1(\lambda) = R_2(\lambda) \text{ и}$$

$$F(\lambda) = 1 \text{ при } R_q(\lambda) = 0 \text{ или } \sin^2 \frac{\phi_1 + \phi_2 - \beta}{2} \approx 0.$$

Наоборот,  $T_0(\lambda) = 0$  выполняется тем точнее, чем больше различаются;  $R_1(\lambda)$  и  $R_2(\lambda)$ , и  $F(\lambda) = 0$  выполняется тем точнее, чем больше величины  $R_1(\lambda)$  и  $\sin^2((\phi_1 + \phi_2 - \beta)/2)$ .

Метод эффективных границ используется в процессе комбинирования нужного фильтра (просветляющего покрытия) из двух мультислоев (или двух слоистых оптических сред) с известными свойствами. Изменения коэффициентов отражения  $R_1(\lambda)$  и  $R_2(\lambda)$  можно достичь как за счет варьирования показателей преломления, так и за счет подбора толщин слоев покрытия, образующих подсистемы 1 и 2. Первоначально метод был разработан для конструирования фильтров, а затем модифицирован для расчета ахроматических просветляющих покрытий [89].

Следующим методом, используемым при решении задачи синтеза, является метод эквивалентных слоев. В нашей работе он используется для синтеза просветляющих покрытий и подробно рассмотрен в разделе 3.2. Этот метод основан на введении понятия эквивалентного показателя преломления [90-93].

Аналитические методы позволяют эффективно решать только простые задачи синтеза покрытий, так как имеют ряд допущений и в основном используются на ранних этапах проектирования ИП. Так, например, в работе [67]

они применимы только для определенного вида функции, зависящей от конструктивных параметров покрытия, и предполагают наличие ограничений на оптические параметры покрытий.

К сожалению, аналитические методы имеют ряд недостатков: при решении сложных задач, требующих анализа покрытия с большим количеством слоев, они приводят к громоздким выражениям, а также полученные этими методами структуры покрытий не всегда могут быть реализуемы на практике. Поэтому, в связи с развитием в настоящее время электронно-вычислительной техники (ЭВТ) задачи синтеза различных интерференционных покрытий решаются преимущественно численными методами. Аналитические методы позволяют эффективно решать только простые задачи синтеза покрытий, так как имеют ряд допущений и в основном используются на ранних этапах проектирования ИП.

### **3.1.2. Численные методы оптимизации характеристик покрытия**

В связи с развитием вычислительной техники применение численных методов значительно упростилось, и появилась возможность более широкого их использования путем создания специализированных компьютерных программ, основанных на задачах оптимизации оценочных функций (функций качества) [76, 94, 95].

Численные методы синтеза многослойных покрытий – это методы решения задачи минимизации функции качества  $F$ . Функция качества  $F$  зависит от конструктивных параметров покрытия (толщин и показателя преломления слоев) и характеризует отклонение требуемой спектральной характеристики от ее приближения. При этом минимуму функции соответствует наилучшее совпадение характеристик, т.е. совпадение синтезированного спектра с заданным. Отличие численных методов от аналитических заключается в том, что ограничения на параметры слоев учитываются уже на этапе формулирования задачи.

В общем виде задача оптимизации формулируется следующим образом [2]: требуется минимизировать скалярную функцию  $F$  в области  $D$ .

$$F(X^*) = \min_{X \in D} F(X) \quad (3.1.2)$$

где  $X$  –  $2N$ -мерный вектор, определенный в линейном пространстве  $E^{2N}$ . Здесь  $N$  – число слоев покрытия. Вектор  $X$  называется вектором конструктивных параметров, координатами которого в общем случае являются показатели преломления  $n_i$  и оптические толщины  $d_i$  слоев интерференционного покрытия. Допустимая область  $D \in E^{2N}$  определяется возможностью практической реализации покрытия.

Значение функции  $F(X^*)$  называется глобальным минимумом, если для всей допустимой области  $D$  выполняется условие  $F(X^*) < F(X)$ . Если это условие выполняется только для некоторой части допустимой области, то  $F(X^*)$  называется локальным минимумом. В общем виде задача нахождения глобального минимума не решена.

При конструировании интерференционных покрытий к ограничениям относятся верхние и нижние границы интервала возможного изменения показателей преломления и толщин слоев. Таким образом, область  $D$  определяется неравенствами:

$$\begin{aligned} \min\{n_i\} < n_i < \max\{n_i\} \\ \min\{d_i\} < d_i < \max\{d_i\} \text{ при } i = 1, 2 \dots N \end{aligned}$$

Здесь символы  $\max$  и  $\min$  - обозначают максимальное и минимальное значение величины, заключенной в фигурные скобки.

При характеристике метода минимизации важным является не столько скорость его сходимости, сколько общий объем вычислений, общее машинное время, необходимое для получения решения с нужной точностью.

**Выбор оценочной функции и постановка задачи синтеза.** Серьезные трудности для всех методов возникают тогда, когда число слоев синтезируемого

покрытия должно быть велико (более 8-10 слоев), а хорошие начальные конструкции неизвестны. Эти трудности удается в значительной степени преодолеть за счет использования специфических методов минимизации оценочных функций, задаваемых формулами 3.1.3-3.1.4 [95]. Эти методы значительно расширяют возможности синтеза. С их помощью удается синтезировать покрытия с весьма сложными спектральными характеристиками, для которых неизвестны хорошие начальные приближения.

Современные методы проектирования многослойных оптических систем рассмотрим на примере так называемых двухкомпонентных покрытий, состоящих из слоев с чередующимися показателями преломления  $n_H$  и  $n_B$  ( $n_H < n_B$ ). В общем виде структура двухкомпонентного покрытия изображена на рис. 3.1.1. При числе слоев, равном  $m$ , она полностью описывается толщиной слоев  $d_1, d_2, \dots, d_m$ . Нумерация слоев произведена в направлении от подложки, на которую нанесено покрытие, к внешней среде, из которой падает плоская электромагнитная волна. При синтезе двухкомпонентных покрытий искомыми параметрами являются толщины его слоев.

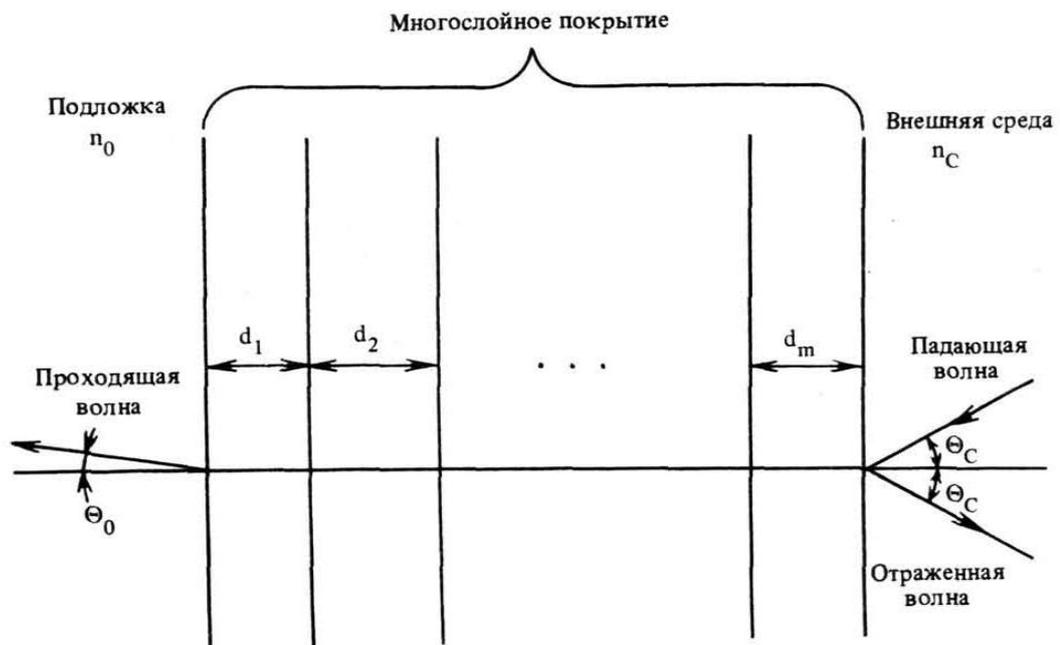


Рис. 3.1.1. Структура двухкомпонентного покрытия

Двухкомпонентные покрытия являются наиболее технологичными при использовании современной напылительной техники. Кроме того, как показывает специальное математическое исследование [96, 97], именно среди них следует во многих случаях искать оптимальные решения задачи синтеза.

Рассмотрим сначала проблему синтеза двухкомпонентных покрытий при нормальном падении света. Интересующей нас при синтезе спектральной характеристикой будем считать энергетический коэффициент отражения. Пусть  $R(\kappa)$  - требуемый вид спектральной зависимости этого коэффициента. В качестве спектрального параметра далее будем использовать волновое число падающей волны в вакууме  $\kappa$ , связанное с длиной волны  $\lambda$  равенством  $\kappa=2\pi/\lambda$ . В общем случае не существует многослойного покрытия, обладающего в точности требуемым коэффициентом отражения  $R(\kappa)$  [94]. Поэтому можно ставить вопрос лишь о синтезе многослойного покрытия, коэффициент отражения, которого в каком-то смысле близок к  $R(\kappa)$ .

Введем  $m$ -мерное пространство искомых параметров системы. Его элементами являются векторы  $X=\{d_1, d_2, \dots, d_m\}$ . Коэффициент отражения многослойной системы, описываемой вектором  $X$ , обозначим  $R(X, \kappa)$ . Пусть  $\kappa_H, \kappa_B$  – нижняя и верхняя границы интересующего нас при синтезе спектрального диапазона. Для оценки близости коэффициента отражения покрытия, описываемого вектором  $X$ , к требуемой зависимости  $R(\kappa)$  наиболее широко используется среднеквадратичная функция качества:

$$F(X) = \int_{\kappa_H}^{\kappa_B} [R(X, \kappa) - R(\kappa)]^2 d\kappa$$

В среднеквадратичную оценку часто вводят весовую функцию  $v(\kappa)$ :

$$F(X) = \int_{\kappa_H}^{\kappa_B} v(\kappa)[R(X, \kappa) - R(\kappa)]^2 d\kappa \quad (3.1.3)$$

Введение весовой функции позволяет по-разному оценивать близость  $R(X, \kappa)$  и  $R(\kappa)$  на разных участках спектра и за счет этого добиваться большей близости

$R(X, \kappa)$  и  $R(\kappa)$  на наиболее важных участках спектра за счет возможного ухудшения точности аппроксимации на других. Весовую функцию часто целесообразно корректировать в процессе синтеза по промежуточным результатам минимизации оценочной функции.

Так как при численном решении задачи синтеза невозможно рассчитать спектральную характеристику  $R(X, \kappa)$  во всех точках рассматриваемого спектрального диапазона, то в этом диапазоне вводится некоторая сетка волновых чисел и вычисления производятся для значений  $\kappa$  из этой сетки. Пусть общее число точек сетки равно  $L$ . Сами точки обозначим  $\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_L$  (при этом  $\kappa_1 = \kappa_H, \kappa_L = \kappa_B$ ). Интегралы на ЭВТ всегда вычисляются по некоторым квадратурным формулам, сводящим их к суммам по заданной сетке волновых чисел. Поэтому оценочную функцию можно сразу задавать в виде:

$$F(X) = \sum_{l=1}^L v_l [R(X, \kappa_l) - R(\kappa_l)]^2 \quad (3.1.4)$$

где  $v_l$  - неотрицательные весовые множители.

В начале решения задачи весовые множители, как правило, полагают равными единице. В дальнейшем они могут корректироваться.

Часто в различных научных источниках в зависимости от решаемой задачи и методов ее решения предлагаются различные формы записи функции качества [95]. Но, так или иначе, задача синтеза сводится к минимизации функции качества (3.1.2).

Численные методы оптимизации характеристик покрытия можно разделить на две категории – методы, требующие начального (нулевого) приближения [2, 94] и методы автоматического конструирования, для которых начальная конструкция неизвестна [67, 98-100]. Методы синтеза, использующие начальное приближение, в свою очередь можно разделить на локальные и нелокальные [67]. В первом случае, ищется локальный минимум функции качества структур на основе аналитических методов синтеза, либо выбирается среди известных систем.

В том случае, если нет достаточно «хорошего» начального приближения или же синтез при известных начальных приближениях не приводит к получению удовлетворительного решения, применяются нелокальные методы синтеза, сочетающие случайный поиск и градиентный или релаксационный спуск.

Ниже коротко рассмотрим основные идеи этих методов.

**Метод градиентного спуска[38, 101].** Этот метод предполагает выбор начального приближения – некоторой точки  $X_0$ . Общих правил выбора точки  $X_0$  в градиентном методе, как и в других методах, нет. В тех случаях, когда из геометрических, физических или каких-либо других соображений может быть получена априорная информация об области расположения точки (или точек) минимума, тогда начальное приближение  $X_0$  стараются выбрать поближе к этой области. Градиент функции  $F(X)$  определяется формулой:

$$\nabla F(X) = \left( \frac{\partial F}{\partial X_1}(X), \frac{\partial F}{\partial X_2}(X), \dots, \frac{\partial F}{\partial X_n}(X) \right). \quad (3.1.5)$$

Метод градиентного спуска допускает одновременную вариацию всех параметров и движение в сторону локального минимума с помощью вектора:

$$X = X_0 - \tau \nabla F(X_0), \quad (\nabla F)_i = \partial F / \partial h_i, \quad i=1,2,\dots,N \quad (3.1.6)$$

где  $X_0$  – вектор, характеризующий параметры исходного покрытия,  $\nabla F(X_0)$  – градиент функционала  $F(X)$  в точке  $X_0$ ,  $\tau$  – единственный варьируемый параметр в выбранном направлении, значение которого  $\tau_{min}$ , соответствующее локальному минимуму функционала, как правило определяется с помощью параболической аппроксимации  $F(\tau)$ ,  $h$  – шаг спуска ( $h>0$ ) [75, 102].

Во всех методах градиентного типа приходится многократно вычислять значения самой оценочной функции и ее градиент. Эти две операции являются основными, поэтому скорость и точность их выполнения в значительной мере определяют вычислительные возможности метода.

**Метод релаксационного (покоординатного) спуска [38, 101].** В практических задачах имеются варианты, когда минимизируемая функция не обладает нужной гладкостью или является гладкой, но вычисление ее производных, с нужной точностью требует больших вычислительных и временных затрат. Тогда желательно иметь методы минимизации, которые требуют лишь вычисления значения функции. Одним из таких методов является метод покоординатного спуска. Этот метод сводит задачу поиска наименьшего значения  $F(X)$  к многократному решению одномерных задач оптимизации. Параметры слоев варьируются последовательно, т.е. сначала определяются оптимальные параметры первого слоя покрытия при фиксированных остальных, затем второго и т.д. После прохода по всем слоям процесс повторяется, начиная с первого слоя и т.д.

Релаксационным способом, так же как и градиентным осуществляется спуск в локальный минимум  $F(X)$  из каждого случайного заданного начального приближения и путем сравнения получаемых локальных минимумов производится выбор наименьшего.

**Метод случайного (стохастического) поиска[2, 38].** Этот метод в отличие от ранее рассмотренных методов, характеризуется намеренным введением элемента случайности в алгоритм поиска. Он может осуществляться двумя способами. При первом способе функция  $F(X)$  находят путем случайного выбора  $X$  допустимой области  $D$ . Точка минимума может быть найдена на любом шаге. Очевидно, что вероятность нахождения минимума в этом случае мала. По этой причине значительно большее распространение получили пошаговые алгоритмы случайного поиска, основанные на последовательном приближении к минимуму за счет использования на каждом шаге информации о минимизируемой функции. В общем случае сдвиг рабочей точки можно записать:

$$X_{k+1} = X_k + \alpha_k C, \text{ где } k = 0, 1, 2, \dots, \quad (3.1.7)$$

где  $\alpha_k$  - некоторая положительная величина, определяющая длину шага,  $C = c_1, c_2, \dots, c_m$  - какая-либо реализация  $m$ -мерного случайного вектора.

Метод случайного поиска функции качества с  $m$  параметрами предполагает наличие датчика (или генератора) случайных чисел, обращаясь к которому в любой нужный момент можно получить какую-либо реализацию  $m$ -мерного случайного вектора  $C$  с заданным распределением. Такие датчики, в виде стандартных процедур или функций имеются в библиотеках подпрограмм на ЭВМ.

Существуют различные алгоритмы метода случайного поиска, которые различаются способом выбора шага  $\alpha_k C$  – это алгоритм с возвратом при неудачном шаге, алгоритм наилучшей пробы, случайный поиск с обучением.

Хотелось бы отметить, что в некоторых случаях методы случайного поиска дают хорошие результаты.

**Метод последовательного синтеза [67, 103, 104].** Первый и весьма оригинальный метод последовательного синтеза, не требующего начального приближения, был предложен Шатиловым и Тютиковой. Синтез покрытия производится путем добавления по одному слою, толщина которого выбирается в соответствии с минимумом оценочной функции. Варьируется лишь толщина одного добавляемого слоя при всех фиксированных параметрах предыдущих слоев. Недостаток этого метода заключается в том, что он легко заходит в тупик при конструировании отражающих покрытий. Но эту проблему можно преодолеть, если к системе последовательно добавлять группу слоев (не менее двух). После присоединения каждой группы путем итерации оптимизируются вначале параметры входящих в нее слоев, а затем – всех предыдущих пленок.

Такой прием позволяет избежать существенного искажения оптических характеристик по сравнению с исходной конструкцией и в то же время дает возможность продолжать оптимизацию за счет увеличения числа варьируемых параметров. Очевидно, что данный метод с гарантией давал бы решение, если бы по мере добавления групп слоев оптические характеристики образующихся покрытий стремились к определенному пределу. Произвольное покрытие таким свойством не обладает.

Этот прием успешен для использования зеркальных покрытий для сглаживания побочных пиков.

**Метод перебора на сетке (сплошного перебора) [75-78].** Методы перебора можно разделить на методы перебора значений функции  $F(X)$  на равномерной сетке и неравномерной.

Метод равномерного перебора относится к пассивным методам потому, что все значения вектора  $X$  задаются одновременно до начала вычислений значений функции. Перебор значений  $X$  реализуется следующим образом. Создаются множества значений параметров покрытий по правилам:

$$\begin{aligned} n_{i1} &= \min\{n_{ij}\}, & n_{i(j+1)} &= n_{ij} + \Delta n, & \text{где } i &= 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, N_i \\ d_{i1} &= \min\{d_{ij}\}, & d_{i(j+1)} &= d_{ij} + \Delta d, & \text{где } i &= 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, D_i \\ \Delta n &= [\max\{n_{ij}\} - \min\{n_{ij}\}] / (N_i - 1), & \Delta d &= [\max\{d_{ij}\} - \min\{d_{ij}\}] / (D_i - 1) \end{aligned} \quad (3.1.8)$$

где  $N_i$  и  $D_i$  – количества значений преломления и толщины  $i$ -ого слоя покрытия. Для упрощения реализации метода можно использовать равные  $N_i$  и  $D_i$  для всех слоев. Вычисленные по формулам (3.1.8) значения  $n_{ij}$  и  $d_{ij}$  помещаются в соответствующие двумерные массивы  $NM_{ij}$  и  $DM_{ij}$ , которые сохраняются до конца вычислений.

Перебор значений  $X$  и соответствующих им значений функции качества  $F(X)$  производится следующим образом. При варьировании толщин и показателей преломления слоев, сначала, создаются двумерные массивы  $NM_{ij}$  и  $DM_{ij}$ , которые содержат множества значений показателей преломления  $n_{ij}$  и значений толщин слоев  $d_{ij}$ . Показатели преломления и толщины задаются по формулам (3.1.8). Поиск решения осуществляется путем перебора различных комбинаций индексов:  $i$  – номер слоя,  $j$  – номер значения толщины или показателей преломления.

Метод перебора на неравномерной сетке заключается в использовании неравномерных значений  $\Delta n$  и  $\Delta d$ . Задачу минимизации  $F(X)$  можно вычислить быстрее, чем на равномерной сетке. Этот метод является последовательным. Здесь

выбор точки  $X_k$  при каждом  $k > 2$  производится с учетом вычислений значения функции в предыдущих точках  $X_1, X_2, \dots, X_{i-1}$ .

**Метод «игольчатого» синтеза.** При числе слоев более 8-10 на современных ЭВМ, как правило, не удастся просчитать достаточное количество вариантов для получения результатов высокого класса.

При решении задач конструирования покрытий, для которых неизвестно первое приближение, достаточно эффективен метод игольчатых вариаций [97].

Рассмотрим лишь один из них [105]. В качестве первого приближения используется относительно толстая пленка с показателем преломления  $n_1$ . Процесс оптимизации идет по схеме, состоящей из следующих этапов.

1. Исследование изменения функции качества при вставке тонкого слоя с показателем преломления  $n_2$  в различные участки покрытия. Изменения функции качества называется чувствительностью и определяется формулой  $\Delta F = F^1 - F^0$  ( $F^0$ ,  $F^1$  – значения функции качества  $F$  до и после вставки игольчатого слоя).

2. Вставка игольчатого слоя в участок, соответствующий наибольшему по модулю отрицательному значению чувствительности  $\Delta F$ . В результате вставки количество слоев покрытия увеличивается на два, если данный участок находится внутри слоя с  $n_1$ .

3. Оптимизация покрытия по толщинам слоев.

4. Повторение первого этапа.

Процесс оптимизации прерывается при получении структуры соответствующей заданным требованиям или когда вставка очередного слоя не приводит к существенному уменьшению функции качества. В результате синтеза получается двухкомпонентное покрытие с показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$ . Некоторые модификации метода игольчатых вариаций позволяют производить одновременную вставку игольчатых слоев в несколько участков, а также в качестве первого приближения использовать многослойные покрытия.

**Метод генетического алгоритма.** Этот метод заключается в анализе спектров при введении изменений (мутаций) в структуре. При нахождении

конечного решения используют симбиоз двух методов – переборного и градиентного спуска. Процессы скрещивания и мутации отвечают за переборную часть, а отбор наилучших решений – градиентный спуск [106].

Получившие развитие в последнее время генетические алгоритмы (ГА) применяются в задачах многопараметрической оптимизации и проектирования в различных областях науки и техники. Применительно к задачам оптимизации и проектирования, в том числе и оптических покрытий, основное отличие этих методов заключается в том, что в процессе нахождения оптимального решения нет необходимости вычислять производные функции качества, что существенным образом сказывается на быстродействии и эффективности алгоритмов. Кроме этого, отличительной чертой алгоритмов, в основе функционирования которых лежат эволюционные стратегии и генетические алгоритмы является то обстоятельство, что на каждом шаге (итерации) уже используется набор (популяция) альтернативных решений [107]. В основе работы генетических алгоритмов лежит моделирование некоторых механизмов популяционной генетики: манипулирование хромосомным набором при формировании генотипа новой особи путем наследования участков хромосомных наборов родителей (кроссинговер), случайное изменение генотипа, известное в природе как мутация. Также важным механизмом, заимствованным у природы, является процедура естественного отбора, направленная на улучшение от поколения к поколению приспособленности членов популяции путем большей способности к «выживанию» особей, обладающих определенными признаками.

### **3.2. Метод эквивалентных слоев**

Метод эквивалентных слоев возник в результате использования матричных вычислений. Матрица непоглощающего мультислоя (слоистой оптической среды) в общем случае имеет вид [45]:

$$M^{sys} = \begin{pmatrix} m_{11} & im_{12} \\ im_{21} & m_{22} \end{pmatrix}$$

В частном случае, когда  $m_{11}=m_{22}$ , матрице  $M^{SYS}$  можно придать вид матрицы одиночного слоя, если ввести две следующие величины: эквивалентную фазовую толщину

$$\Phi_E = \arccos\{m_{11}\} = \arccos\{m_{22}\} \quad (3.2.1)$$

и эквивалентный показатель преломления

$$N_E = +\sqrt{m_{21}/m_{12}} \quad (3.2.2)$$

При этом матрица  $M^{SYS}$  принимает вид

$$M^{SYS} = \begin{pmatrix} \cos \Phi_E & i \frac{1}{N_E} \sin \Phi_E \\ i N_E \sin \Phi_E & \cos \Phi_E \end{pmatrix} \quad (3.2.3)$$

здесь учтено, что  $m_{12}m_{21} = 1 - m_{11}m_{22} = \sin^2 \Phi_E$

Так как элементы матрицы (3.2.3) зависят от длины волны, следовательно величины  $\Phi_E$  и  $N_E$  также являются функциями длины волны. Из формул (3.2.2) и (3.2.3) следует, что при  $m_{11} < 1$   $\Phi_E$  и  $N_E$  принимают действительные значения. При  $m_{11} > 1$  эквивалентный показатель преломления ( $N_E$ ) является чисто мнимой величиной, а эквивалентная фазовая толщина ( $\Phi_E$ ) - комплексной.

Области длин волн, которым отвечают мнимые значения эквивалентного показателя преломления или комплексные значения эквивалентной фазовой толщины называются полосами заграждения, а все остальные области - полосами пропускания [45].

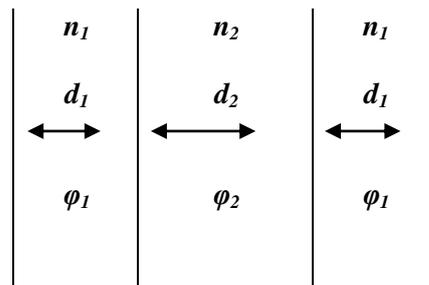
Используя понятия эквивалентный показатель преломления и эквивалентная фазовая толщина, можно любую пленку  $P$  для фиксированной длины волны заменить симметричной комбинацией пленок  $ABC...CBA$ . В данном случае

эквивалентность пленки  $P$  и комбинации  $ABC...CBA$  следует понимать в том смысле, что обе эти комбинации описываются одной и той же матрицей.

Понятие эквивалентности пленочных систем раскрывается в теореме Херпина [43]: любая комбинация пленок для фиксированной длины волны эквивалентна двухслойной пленочной системе.

При дальнейшем развитии теории синтеза метод эквивалентных слоев оказался чрезвычайно перспективным при конструировании реализуемых на практике покрытий. Сначала находится структура с произвольными значениями показателей преломления и толщин. Далее производится замена отдельных слоев для которых не найдены пленкообразующие материалы, на эквивалентные трехслойные симметричные системы, состоящие из реальных веществ. Затем находится окончательная конструкция покрытия в результате оптимизации толщин слоев с учетом дисперсии показателя преломления [108].

**Трехслойные симметричные комбинации пленок [109].** Рассмотрим симметричную комбинацию из трех непоглощающих однородных слоев с физическими толщинами  $d_1, 2d_2, d_1$  и показателями преломления  $n_1, n_2, n_1$  (рис.3.2.1).



**Рис. 3.2.1.** Симметричная комбинация трех однородных непоглощающих слоев

Характеристическая матрица этой трехслойной комбинации при нормальном падении имеет вид:

$$M^{sys} = \begin{pmatrix} \cos 2\varphi_1 \cos 2\varphi_2 - p \sin 2\varphi_1 \sin 2\varphi_2 & \frac{i}{n_1} (\sin 2\varphi_1 \cos 2\varphi_2 + p \cos 2\varphi_1 \sin 2\varphi_2 + q \sin 2\varphi_2) \\ i n_1 (\sin 2\varphi_1 \cos 2\varphi_2 + p \cos 2\varphi_1 \sin 2\varphi_2 - q \sin 2\varphi_2) & \cos 2\varphi_1 \cos 2\varphi_2 - p \sin 2\varphi_1 \sin 2\varphi_2 \end{pmatrix}$$

где  $p = \frac{1}{2} \left( \frac{n_1}{n_2} + \frac{n_2}{n_1} \right)$ ,  $q = \frac{1}{2} \left( \frac{n_1}{n_2} - \frac{n_2}{n_1} \right)$  и  $\varphi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} (n_1 d_1)$ ,  $\varphi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} (n_2 d_2)$  - фазовые толщины слоев.

Эквивалентный слой обладает на контрольной длине волны  $\lambda_0$  теми же оптическими свойствами, что и трехслойная симметричная комбинация, если эквивалентная фазовая толщина  $\Phi_E$  и эквивалентный показатель преломления  $N_E$  определены следующим образом:

$$\cos \Phi_E = \cos 2\varphi_1 \cos 2\varphi_2 - p \sin 2\varphi_1 \sin 2\varphi_2 \quad (3.2.4)$$

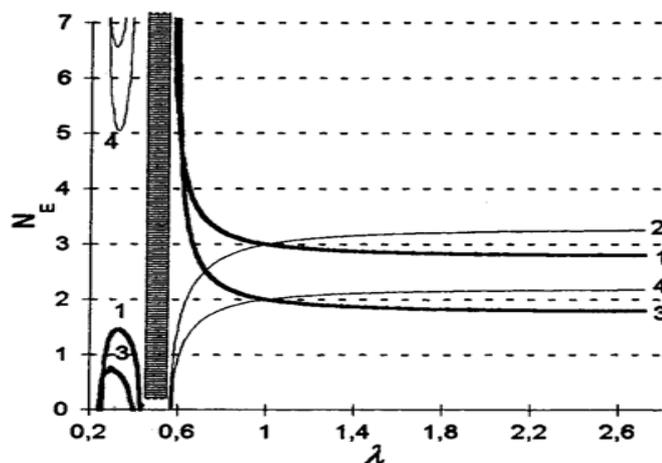
$$N_E = n_1 \sqrt{\frac{\sin 2\varphi_1 \cos 2\varphi_2 + p \cos 2\varphi_1 \sin 2\varphi_2 - q \sin 2\varphi_2}{\sin 2\varphi_1 \cos 2\varphi_2 + p \cos 2\varphi_1 \sin 2\varphi_2 + q \sin 2\varphi_2}} \quad (3.2.5)$$

Формулы (3.2.4) и (3.2.5) определяют показатель преломления и фазовую толщину эквивалентной пленки, полученной из трехслойной комбинации при заданных  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  параметрах. Условимся, что показатели преломления  $n_1$  и  $n_2$  фиксированы, а физические толщины слоев  $d_1$  и  $d_2$  меняются таким образом, что фазовые толщины  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  меняются в диапазоне от 0 до  $\pi$ . Потребуем также, чтобы эквивалентная фазовая толщина  $\Phi_E$  и эквивалентный показатель преломления  $N_E$  были действительными числами. Это означает, что должны быть выполнены следующие условия:

$$\cos 2\varphi_1 \cos 2\varphi_2 - p \sin 2\varphi_1 \sin 2\varphi_2 \leq 1 \quad (3.2.6)$$

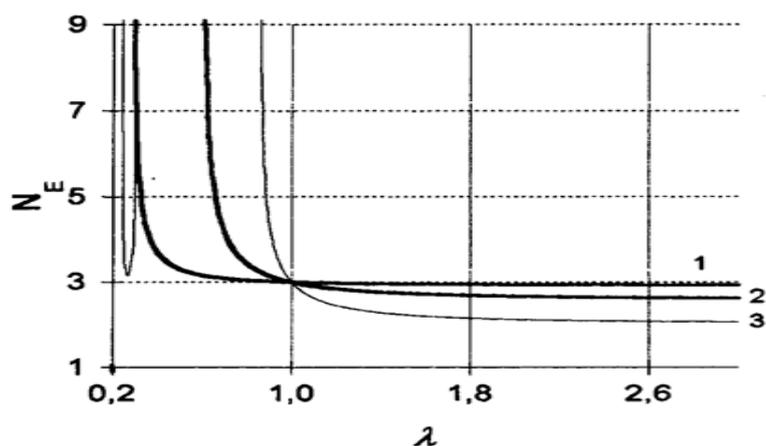
$$\frac{\sin 2\varphi_1 \cos 2\varphi_2 + p \cos 2\varphi_1 \sin 2\varphi_2 - q \sin 2\varphi_2}{\sin 2\varphi_1 \cos 2\varphi_2 + p \cos 2\varphi_1 \sin 2\varphi_2 + q \sin 2\varphi_2} \geq 0 \quad (3.2.7)$$

На рис.3.2.2. и рис. 3.2.3 представлены графики зависимости показателя преломления эквивалентной структуры от длины волны, рассчитанные по формулам 3.2.4-3.2.5.



**Рис. 3.2.2.** Зависимости эквивалентных показателей преломления  $N_E$  от относительной длины волны  $\lambda$  для симметричных трехслойных конструкций:

$$\begin{aligned} & n=2.4, d=0.346; n=4, d=0.277; n=2.4, d=0.346 \text{ (1),} \\ & n=4, d=0.297; n=2.4, d=0.368; n=4, d=0.297 \text{ (2),} \\ & n=1.35, d=0.281; n=2.65, d=0.374; n=1.35, d=0.281 \text{ (3),} \\ & n=2.65, d=0.346; n=1.35, d=0.257; n=2.65, d=0.346 \text{ (4)} \end{aligned}$$



**Рис. 3.2.3.** Зависимости эквивалентных показателей преломления  $N_E$  от относительной длины волны  $\lambda$  для симметричных трехслойных конструкций типа

**LHL** ( $n_L=1.65, n_H=3.5$ ) с эквивалентными толщинами

$$d_E=0.5 \text{ (1), } d_E=1 \text{ (2), } d_E=1.5 \text{ (3)}$$

Рассматриваемый метод эквивалентных слоев требует выбора нулевого приближения, например, по числу используемых слоев. Более широкополосные покрытия требуют большего числа слоев. Этот метод является приближенным, так как эквивалентная структура не имеет одинаковый показатель преломления для всех длин волн (см. рис.3.2.2-3.2.3). Однако, этот метод прост для практического использования. Рассчитанные этим методом конструкции покрытий можно использовать в качестве следующего приближения для последующей оптимизации.

### **3.3. Программное обеспечение синтеза покрытий**

На кафедре физики была разработана программа FlmMgr [110], которая предназначена для решения задач анализа и синтеза ИП любого типа. Программа написана на языке Object Pascal в среде Delphi. Она предназначена для расчета спектров отражения, пропускания и поглощения многослойных интерференционных покрытий, и для синтеза покрытия с целью получения заданного спектра отражения или пропускания. В программе предусмотрен диалоговый режим работы, что, при продуманном, удобном и функциональном интерфейсе, позволяет пользователю корректировать или оптимизировать синтезируемые покрытия в реальном масштабе времени и находить устойчивые решения.

В программе есть возможность введени базы данных, где учтены дисперсии показателей преломления и поглощения пленкообразующих материалов во всем рассматриваемом диапазоне спектра.

Задаваемыми параметрами являются: спектральный интервал, число слоев, значения показателей преломления и оптических толщин слоев, диапазон перебора значений показателей преломления и оптических толщин слоев, величину шага поиска. Расчет спектров ведется как для нормального, так и для

наклонного падения излучения, причем в случае наклонного падения излучение может быть любой поляризации.

В программе осуществляется поиск минимума функции качества, взятой в виде:

$$F = \sum_{i=1}^N |R_{расч}(\lambda_i) - R_{эталон}(\lambda_i)| \cdot W(\lambda_i), \quad (3.3.1)$$

где  $R_{расч}(\lambda_i)$  и  $R_{эталон}(\lambda_i)$  – расчетное и эталонное (требуемое) значения коэффициента отражения на длине волны  $\lambda_i = \lambda_{min} + (i-1)\Delta\lambda$ ;  $\lambda_{min}$  – коротковолновая граница спектрального интервала;  $\Delta\lambda$  – величина шага поиска;  $N$  – число точек, в которых вычисляется спектр, и  $W(\lambda_i)$  – весовой множитель в точке  $i$ , задаваемый пользователем.

В формуле (3.3.1) модули относительных отклонений значений отражения или пропускания от заданных в каждой точке спектра умножаются на весовые множители, задаваемые пользователем, что дает возможность корректировать расчетную спектральную кривую, максимально приближая ее к эталонной, на наиболее важных участках спектра, непосредственно в процессе синтеза. Спектры пропускания, отражения и поглощения рассчитываются матричным методом [39] и отображаются на экране дисплея. На любом этапе синтеза можно вывести функцию качества.

В основе используемой программы для минимизации функции качества (3.3.1), зависящей от конструктивных параметров покрытия – толщин и показателей преломления слоев, используются оптимизационные методы случайного перебора в диалоговом режиме с переменным шагом поиска и квадратичной аппроксимации Пауэлла.

Для преодоления проблем, связанных с выбором первого приближения структуры покрытия и его оптимизацией, а также с исключением поисков в локальных минимумах в программе предусмотрено поэтапное (или выборочное) выполнение двух поисковых алгоритмов:

- случайного перебора с переменным шагом поиска, когда генерируются случайные значения показателя преломления и толщины каждого слоя и вычисляется отклонение от эталонного спектра. В случае минимального отклонения значения показателей преломления и толщины сохраняются. В качестве отклонения используется сумма модулей относительных отклонений значений отражения или пропускания от заданных в каждой точке спектра. Относительные отклонения в каждой точке умножаются на весовые множители, задаваемые пользователем.

- квадратичной аппроксимации Пауэлла, при использовании, которого начальным приближением может служить найденная первым методом структура. В общем случае данный метод применяется для уточнения полученного результата и для уменьшения времени поиска окончательной структуры покрытия.

Рассмотрим алгоритм процесса синтеза ИП по разработанной методике и программе [110].

В начале процесса синтеза ИП вводится информация о пленкообразующих материалах, которые предполагается использовать в покрытии. Информация может быть введена двумя способами. В одном случае вводится число слоев и некоторый набор пленок с некоторыми толщинами и произвольными (в пределах допустимого от 1.3 до 5.2) показателями преломления. Во втором случае вводится набор пленок с некоторыми толщинами ( $h$ ) и показателями преломления ( $n$ ), определяемыми информацией имеющейся в базе данных программы. Затем проводится ввод данных, а именно: рабочий спектральный диапазон (в длинах волн или волновых числах), материалы подложек и окружающей среды, уточняется начальное приближение структуры покрытия ( $n$  и  $h$ , число слоев), исходя из общих требований для заданного типа покрытия, данные об эталонном (требуемом) спектре покрытия и т.д.

После этого осуществляется выбор режима оптимизации – метод случайного поиска (или метод Пауэлла по выбору). При этом запускается процесс

генерации по случайному закону векторов  $n$  и  $h$  слоев в заданном диапазоне значений, и начинают вычисляться спектры отражения и пропускания первичной структуры покрытия путем определения значений соответствующих функций качества, которые сохраняются.

Если новое вычисленное значение функции качества меньше предыдущего, то соответствующие векторы  $n$  и  $h$  сохраняются как оптимальные на данном этапе синтеза. Текущие значения функции качества выводятся на экран дисплея для того, чтобы пользователь мог визуально контролировать процесс оптимизации.

При удовлетворительном решении, строятся графики спектров, и по графикам визуально и аналитически определяется близость полученного результата к требуемому решению.

При неудовлетворительном виде спектра проводится корректировка весовых множителей для устранения нежелательных экстремумов в расчетном спектре, и вновь запускается сначала процесс генерации по случайному закону  $n$  и  $h$  слоев и вычисляются значения функции качества для спектральных коэффициентов отражения и пропускания.

Перечислим основные элементы управления интерфейса программы (см. рис. 3.3.1). Вверху главного окна программы расположен переключатель вкладок, содержащих элементы управления программы:

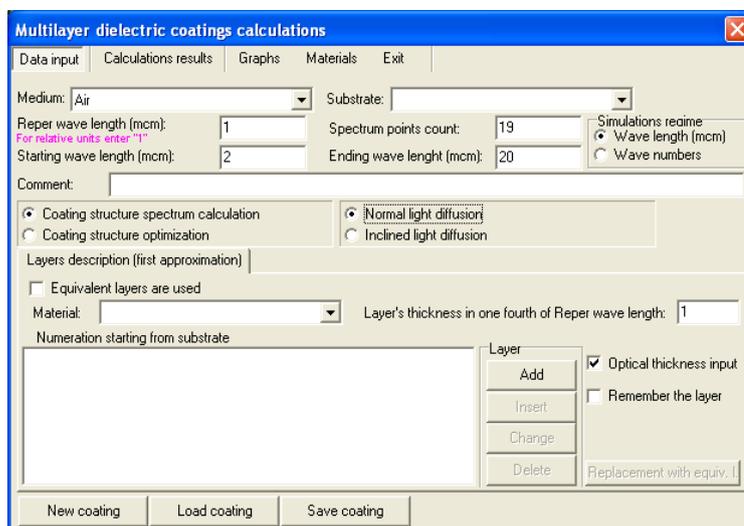


Рис. 3.3.1. Интерфейс программы.

- «Data input» – ввод параметров среды, подложки, слоев, угловых характеристик излучения и т.д., а также запуск процесса оптимизации покрытия;
- «Calculations results» – отображение спектральных значений пропускания, отражения и поглощения, а также структура оптимизированного покрытия;
- «Graphs» – Графическое изображение спектров;
- «Materials» – редактор базы данных используемых материалов;
- «Exit» – окончание работы с программой.

Нами была проведена модернизация программы FlmMgr [110]. В модернизированном варианте она получила название Film Manager. В неё были добавлены следующие опции:

1. Внедрили опцию замены пленки с произвольным показателем преломления на эквивалентную трехслойную структуру типа HLH или LHL.
2. Ввели замену трехслойной структуру типа HLH или LHL на реальные пленки из базы данных.
3. Ввели возможность анализа и синтеза от подложки конечной толщины, наряду с полубесконечной подложкой.
4. Изменили диапазон длин волн и диапазоны показателей преломления и поглощения.
5. Расширили базу данных значений показателей преломления и поглощения пленок.

Эти дополнения в программе были необходимы для синтеза различных покрытий, в первую очередь просветляющих (антиотражающих). Примеры синтеза ахроматических просветляющих покрытий приведены в 5 главе.

## ГЛАВА 4. АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ СИНТЕЗИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ

### 4.1. Обзор методов анализа устойчивости

При изготовлении покрытия не удастся точно получить вычисленные значения показателей преломления и толщин слоев. Поэтому важно оценить при каком разбросе этих значений характеристики покрытия оказываются нечувствительными или малочувствительными к отклонениям параметров слоев от номинальных [2].

В большинстве работ по синтезу интерференционных покрытий вопросы исследования устойчивости многослойных структур затрагиваются недостаточно. В первую очередь, это связано с некорректностью самой задачи и отсутствием критериев отбора наиболее пригодного из полученных решений. Условно методы анализа устойчивости можно разделить на статистические [2, 67, 111-112] и аналитические [2, 113-116].

Один из вариантов статистического метода описан в [111]. При измерении толщины осаждаемого слоя в процессе напыления всегда присутствуют случайные или систематические ошибки, обусловленные инструментальной погрешностью используемой аппаратуры, несовершенством методики измерения или просто человеческим фактором. Поэтому получаемые на практике пленки могут иметь толщину, отличающуюся от расчетной. Анализ устойчивости структур покрытия проводился случайной вариацией толщин слоев, причем толщина каждого слоя могла, как увеличиваться на величину ошибки, так и уменьшаться. В этой же работе для каждого из двух вариантов покрытий было рассчитано по несколько десятков вариаций. За критерий устойчивости структуры принимались не математически определенные через функцию качества величины, а визуальное сравнение полученных спектров между собой и с начальными спектральными характеристиками.

В работах [2, 67, 112] проведен анализ влияния случайных ошибок в толщине слоя на спектры некоторых структур и показана возможность корректирования изготовленных структур, а также снижение искажения полученных спектров.

В качестве примера аналитических методов можно привести работы [2, 114 - 116], где проведен анализ влияния случайных ошибок в толщине слоя на спектры структур и показана принципиальная возможность корректировки изготовленных структур и снижения искажения полученных спектров. В основе этих методик лежит анализ первой или второй производной функции качества  $F(X)$  (целевой функции), определенной на дискретном множестве, содержащем  $L$  точек, в виде:

$$F(X) = \left\{ \sum_{i=1}^L w(\lambda_i) |T(X, \lambda_i) - T_0(\lambda_i)|^q \right\}^{\frac{1}{q}} \quad (4.1.1)$$

где  $T(X, \lambda_i)$  – текущее спектральное значение коэффициента пропускания, которое определяется длиной волны  $\lambda_i$  и параметрами всех пленок  $X$ ;  $T_0(\lambda_i)$  – заданное значение коэффициента пропускания;  $w(\lambda_i)$  – весовая функция. При расчете мы принимали  $w(\lambda_i) = 1$ ;  $q$  – целое положительное число. Обычно выбирают  $q=2$ , тогда представление функции качества в виде (4.1.1) характеризует среднеквадратичное приближение. Здесь и в дальнейшем параметры слоя будем обозначать через  $j$ , а длину волны через  $i$ .

В настоящее время используются различные варианты функции качества  $F(X)$ , независимо от этого наилучшее соответствие характеристик синтезированного покрытия к требуемым характеристикам не означает, что структура будет устойчива к вариациям толщин слоев. Многоэкстремальность задачи синтеза определяет существование множества локальных минимумов – «долин», на дне которых находятся искомые решения [114, 116]. В случае оптимизированной структуры покрытия предполагается, что функция качества находится в одном из локальных минимумов.

В работе [2] в качестве критерия устойчивости предлагается использовать производные функции качества (целевой функции). Оценить степень рассеяния характеристик можно по величине  $\Delta F$ . Для малых приращений  $\Delta x_j$  изменение целевой функции можно записать:

$$\Delta F = \sum_{j=1}^{2m} \Delta x_j \left. \frac{\partial F(x)}{\partial x_j} \right|_{x_j=x_j^0}, \quad (4.1.2)$$

где  $x_j^0$  – номинальное значение  $j$ -го слоя,  $\Delta x_j$  – вариация параметров  $x_j$ .

Если заранее известен интервал изменения параметра слоя  $-\varepsilon_j \leq x_j \leq \varepsilon_j$ , то можно вычислить максимальное приращение целевой функции:

$$\Delta F_{\max} = \sum_{j=1}^{2m} (\pm \varepsilon_j) \left. \frac{\partial F(x)}{\partial x_j} \right|_{x_j=x_j^0}, \quad (4.1.3)$$

причем знак  $\varepsilon_j$  выбирают одинаковым со знаком частной производной.

Исследования, проведенные в работе [113] показывают возможность определения наиболее критичных к ошибкам слоев в многослойной системе путем определения значения первой частной производной функции пропускания (при разложении  $T$  в ряд Тейлора) по оптической толщине каждого слоя:

$$T = T(n_1^0, \dots, n_j^0; n_1^0 d_1^0, \dots, n_j^0 d_j^0; \lambda, \alpha^0) + \sum_{j=1}^N \frac{\partial T(n_j^0 d_j^0)}{\partial (n_j d_j)} \Delta(n_j d_j) + \dots, \quad (4.1.4)$$

где верхний индекс 0 означает нулевое приближение, вблизи которого проводится варьирование параметров  $(n_l, n_j, n_l d_l, \alpha)$ .

Расчет нормированных частных производных энергетического коэффициента пропускания по оптическим толщинам последующих слоев позволяет выявить спектральные интервалы, в которых возможна оперативная коррекция ошибки в анализируемом слое путем изменения оптических толщин последующих слоев.

В работах [2, 114-117] проведен анализ влияния случайных ошибок на спектры структур и показана принципиальная возможность корректировки

изготовленных структур и снижения искажения полученных спектров. В основе этих методик лежит анализ первой или второй производных функции качества  $F(X)$  (целевой функции), определенной на дискретном множестве, содержащем  $L$  точек, в виде

$$S_j(X) = \left( \frac{\partial F^2(X)}{\partial D_j^2} \right)^2. \quad (4.1.5)$$

$$S(X) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N S_j(X) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left( \frac{\partial^2 F(X)}{\partial D_j^2} \right)^2. \quad (4.1.6)$$

где  $N$  – количество слоев в структуре покрытия, а  $F(X)$  – определяется выражением (4.1.1).

Зависимость функции качества от параметров вблизи экстремума можно с большой точностью предположить параболической. В этом случае, в точке локального минимума первая частная производная функции качества по оптическим толщинам близка к нулю, а вторая частная производная  $\frac{\partial F^2(X)}{\partial D_j^2}$  показывает крутизну склонов многомерной долины, где находится решение. Здесь  $D_j = n_j d$  – оптическая толщина  $j$ -го слоя. Чем больше вторая производная, тем больше увеличение функции качества при отклонении параметра от точки локального минимума, т.е. долина в направлении переменной этого слоя имеет большую крутизну. Другими словами, если слой имеет большую вторую производную в точке локального минимума, то небольшие изменения его толщины приведут к значительному увеличению функционала качества, т.е. к существенному отклонению спектральной характеристики от заданной.

В работах [114-117] проводится детальный анализ критерия (4.1.5 - 4.1.6) на ряде примеров. Однако, как будет показано ниже, ни первая, ни вторая производные не дают количественного согласования с реальной трансформацией спектров.

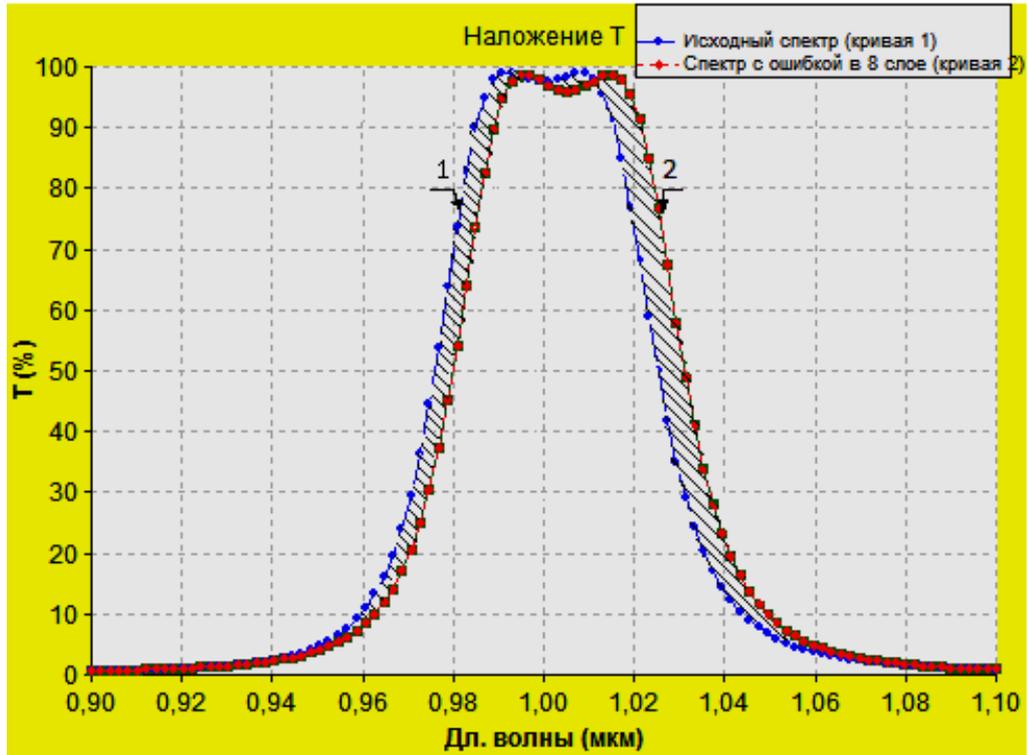
## 4.2. Критерий устойчивости на основе анализа трансформации спектров

Рассмотрим предложенную нами методику, основанную на анализе трансформации спектров при конечном значении ошибок толщины в слоях. В дальнейшем будем использовать следующие обозначения. Многослойное пленочное покрытие состоит из  $m$  слоев, с обеих сторон к которым примыкают полубесконечные среды. Слои пронумерованы в направлении распространения световой волны. Математически многослойные оптические системы описываются  $m$  – слойной системой, состоящей из конечного числа слоев с различными комплексными показателями преломления  $N_j = n_j - ik_j$  и оптическими толщинами  $D_j = n_j d$ , сравнимыми с длиной световой волны. Здесь  $n_j$  – показатель преломления, а  $k_j$  – показатель поглощения  $j$  - слоя. Обычно, предполагают, что оптические слои являются однородными, изотропными и имеют строго параллельные границы и бесконечную протяженность. Окаймляющие среды также считают однородными и изотропными.

Для иллюстрации предлагаемой методики рассмотрим спектры пропускания полосового 15-слойного интерференционного фильтра, спектр которого представлен на рис. 4.2.1.

Расстояние между точками в шкале длин волн  $\Delta\lambda = (\lambda_N - \lambda_1)/N$ , где  $N$  – число точек в спектре.

На рис. 4.2.1 кривая 1 соответствует спектру пропускания структуры по таблице 4.2.1, а кривая 2 – соответствует смещению спектра пропускания структуры в 8 слое по той же таблице, в котором толщина центрального слоя равна 0.275. В качестве критерия устойчивости нами предлагается использовать модуль разности площадей кривых 1 и 2, т.е. другими словами заштрихованную площадь.



**Рис. 4.2.1.** Спектры пропускания 15-слойного полосового интерференционного фильтра

Аналитически ее величина выражается как:

$$\begin{aligned} \Delta F_k &= \frac{\lambda_N - \lambda_1}{N} \left( \sum_{\lambda_i} \left| \frac{T(\lambda_i, D_k) - T(\lambda_i, D_k + \Delta D_k)}{\Delta D_k} \right| \right) |\Delta D_k| = \\ &= \frac{\lambda_N - \lambda_1}{N} \left( \sum_{\lambda_i} |T(\lambda_i, D_k) - T(\lambda_i, D_k + \Delta D_k)| \right). \end{aligned} \quad (4.2.1)$$

Этот метод характеризует трансформацию спектра при произвольных значениях  $\Delta D_k$ . Введенный нами критерий может быть использован и для анализа устойчивости синтезированной структуры, и для коррекции спектральных характеристик в процессе изготовления покрытия. Как будет показано ниже, для этого удобно использовать гистограммы устойчивости всей структуры.

В работе [113] проведен анализ первой производной от пропускания (при  $\Delta D_k > 0$ ):

$$\Delta P_k = \frac{\lambda_N - \lambda_1}{N} \left( \sum_{\lambda_i} \left| \frac{T(\lambda_i, D_k) - T(\lambda_i, D_k + \Delta D_k)}{\Delta D_k} = \frac{\lambda_N - \lambda_1}{N} \sum_{\Delta D \rightarrow 0} \left( \frac{\partial T}{\partial D_k} \right) \right) \right) \quad (4.2.2)$$

Фактически критерий устойчивости (4.1.4), в котором используется член  $\sum_{j=1}^N \frac{\partial T(n_j^0 d_j^0)}{\partial (n_j d_j)} \Delta(n_j d_j)$  аналогичен функции устойчивости (4.2.2), в которой фиксируется значение длины волны для каждой точки спектра, а варьируемым параметром является изменение толщины пленки  $\Delta D_k$ . В случае линейной зависимости  $\Delta P_k$  от  $\Delta D_k$  функция даст постоянную, характеризующую устойчивость анализируемого слоя. Поэтому основные выводы по значениям первой и второй производной функции устойчивости по формуле (4.2.2) для бесконечно малых значений  $\Delta D_k$  применимы к функции устойчивости (4.1.4). Если провести качественный анализ критерия по формуле (4.1.4), то становится очевидным, что он нелинейно зависит от величины ошибки  $\Delta D_k$ . Она имеет максимальную кривизну вблизи  $\Delta D_k \rightarrow 0$ , а затем стремится к насыщению при  $\Delta D_k$  равным нескольким (одной или двум) полуширинам спектра пропускания. В этом случае, ее величина просто равна удвоенной площади, ограниченной 1 кривой.

Для других слоев или структур это будет более сложная зависимость, анализ которой проведем в разделе 4.4. Отсюда следует, что использование критерия устойчивости, базирующегося на анализе производных от спектра или функции качества, недостаточно корректно, и в некоторых случаях может дать большое расхождение при конечных значениях  $\Delta D_k$ .

### **4.3. Программное обеспечение для анализа устойчивости**

Для анализа критериев устойчивости была разработана программа, написанная на языке Wolfram Mathematica - 8.0 [58]. В основе расчетов лежит матричный метод с использованием характеристических матриц отдельных слоев

[39], который рассмотрен в первой главе. Программное обеспечение (ПО) позволяет рассчитывать спектры пропускания и отражения покрытий, строить 3D-графики для спектров пропускания, находить значения критериев устойчивости синтезированных покрытий по разным методикам, находить функции  $\Delta F_k$  и  $\Delta P_k$  по формулам (4.2.1-4.2.2), а также строить гистограммы устойчивости  $\Delta F_k$  для всех слоев покрытия при введении произвольных ошибок  $\Delta D_k$ . На этой основе предлагаются методы коррекции изготавливаемых структур в процессе их изготовления [118-119].

Для синтеза и анализа спектров использовалась программа Film Manager [120], описанная в разделе 3.3. Программа Film Manager позволяет синтезировать покрытия с заданным спектром. Конечный результат синтезированных оптических покрытий и материалы сохраняются в "\*. dan" файлах, которые и используются в нашей программе.

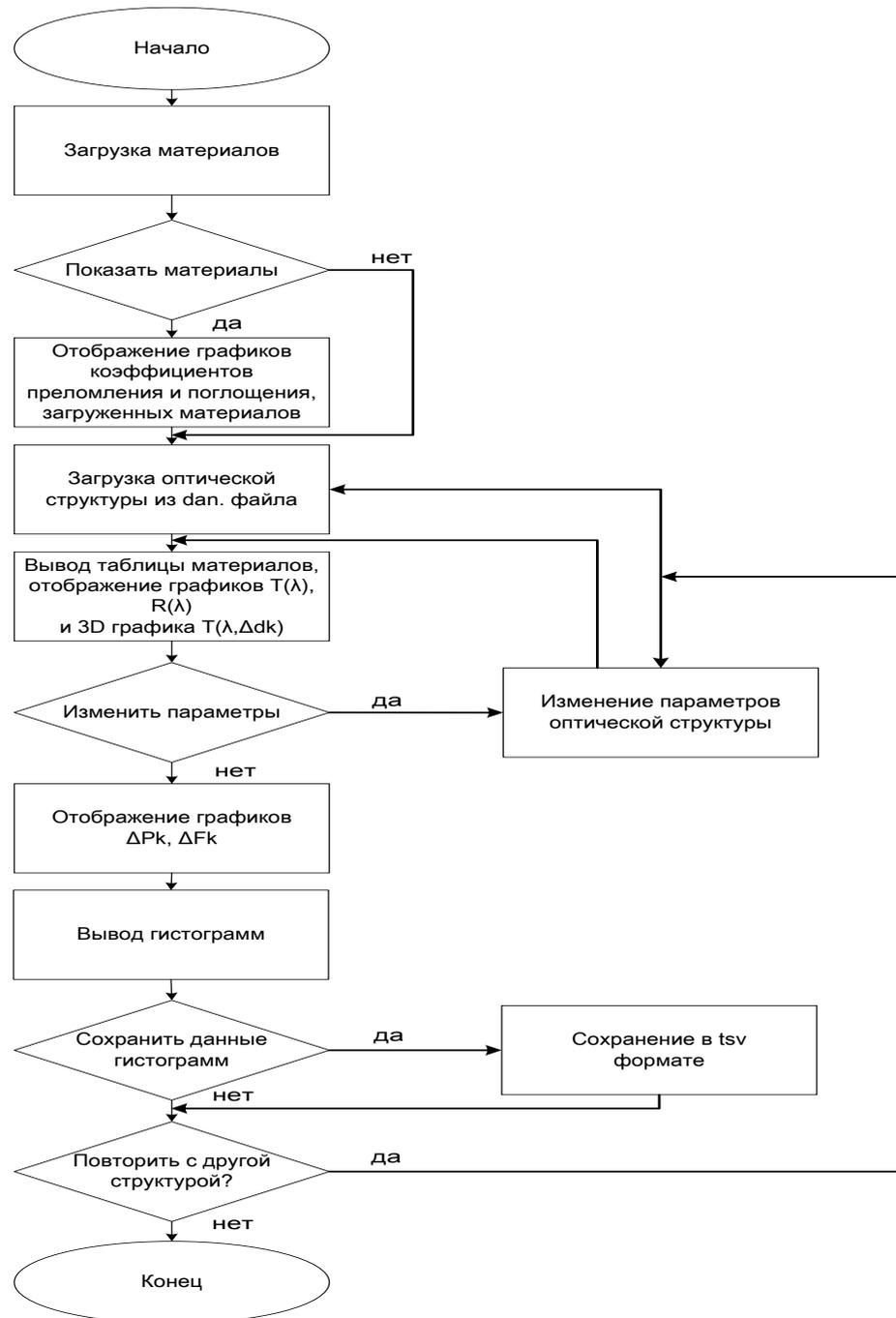
Рассмотрим кратко возможности разработанной программы для исследований устойчивости синтезированных покрытий по трансформации спектров пропускания и коррекции изготавливаемых покрытий. В основе программного обеспечения лежит предложенная методика анализа устойчивости синтезированных покрытий, описанная в разделе 4.2 [121-124].

Вся программа разбита на несколько шагов. Алгоритм программы приведен на рис. 4.3.1.

Первый шаг: загрузка материалов. Программа загружает базу данных из Film Manager. Программа может строить графики спектров для любого из имеющихся материалов.

Второй шаг: отображение спектров пропускания  $T$ , отражения  $R$ . На этом шаге осуществляется загрузка исследуемой оптической структуры из "\*. dan" файла. Затем происходит вывод таблицы материалов, в которой отображены слои оптической структуры. Программа предоставляет возможность строить графики  $T, R$  от длины волны  $\lambda$ , с сохранением их в файле. Если необходимо, то в исследуемой структуре можно изменить толщины слоев оптической структуры и

просмотреть информацию, полученную из "\*. dan" файла. В программе имеется функция вывода 3D, показывающего зависимость спектра  $T$  оптической структуры от отклонения толщины одного из слоев с возможностью изменения номера слоя и интервала, в котором допускаются отклонения.



**Рис.4.3.1.** Алгоритм программы

Третий шаг: анализ формул. На этом шаге программа позволяет наглядно проиллюстрировать вывод графика зависимости  $\Delta F_k$  и  $\Delta P_k$  от отклонения  $\Delta D_k$  толщины одного из слоев с возможностью изменить номер  $k$  рассматриваемого слоя и диапазон рассматриваемых отклонений.

Четвертый шаг: построение значений функции устойчивости по новому критерию. На этом этапе пользователь может вывести гистограммы, показывающие зависимость величины  $\Delta F_k$  и  $\Delta P_k$  от  $\Delta D_k$  для заданного номера слоя при фиксированном значении  $\Delta D_k$  с возможностью изменения этого значения.

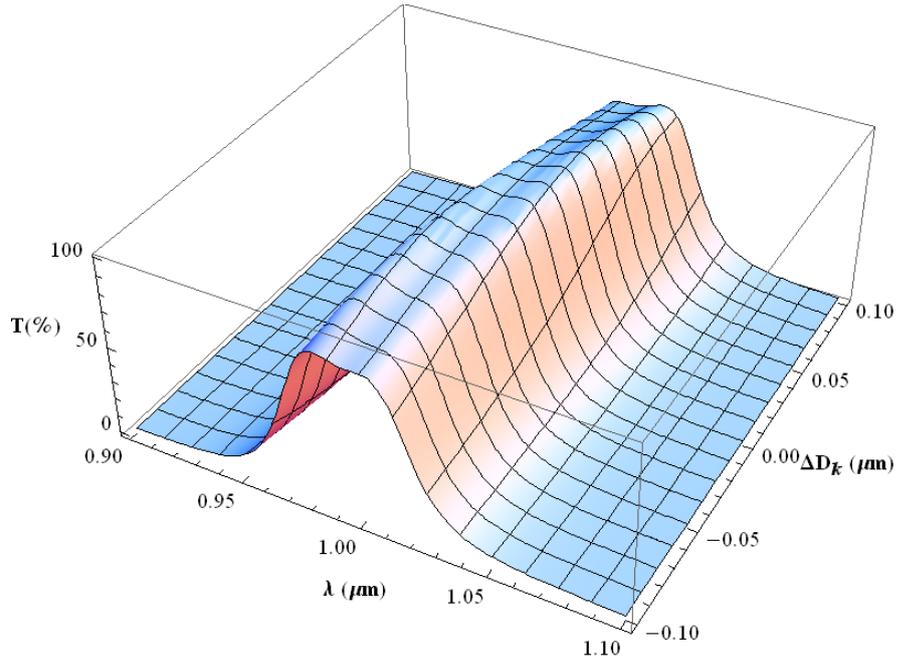
На последнем шаге, есть возможность построить значения функции устойчивости всех заданных слоев по новому критерию (4.2.1) и критерию (4.2.2), а также гистограммы устойчивости.

#### **4.4. Сравнительный анализ критериев устойчивости интерференционных покрытий**

Проведем сравнительный анализ известных и предложенного критерия устойчивости, на примере различных типов покрытий, а также рассмотрим возможности вносить коррекции в толщины пленок в процессе изготовления с целью получения заданного спектра [118-126].

##### **4.4.1. Полосовой интерференционный фильтр**

В качестве первого примера рассмотрим 15-ти слойный полосовой интерференционный фильтр (см. рис. 4.2.1), структура которого и устойчивость по разным критериям приведена в таблице 4.4.1. На рис. 4.4.1 приведен его 3D-график. По вертикальной оси отложено пропускание  $T$ , а по горизонтальным осям – длины волн  $\lambda$  и ошибки в слое  $\Delta D_k$ .



**Рис. 4.4.1.** 3D - график пропускания полосового интерференционного 15-слойного фильтра

Одним из основных условий использования фильтров является точность попадания длины волны в максимум пропускания в заданный диапазон и возможность коррекции фильтра в процессе изготовления. Поэтому в качестве эталона мы использовали сравнение всех критериев со сдвигом максимума пропускания фильтра за счет ошибок в толщинах слоев. В таблице 4.4.1 продемонстрирована структура покрытия и результаты расчетов по всем известным методикам (4.1.5 - 4.1.6, 4.2.2), в том числе и предложенной нами (4.2.1).

В таблице 4.4.1 приведено нормированное на максимальное значение смещение длины волны центра тяжести спектра с введенными ошибками –  $\Delta\lambda_{max}$  в зависимости от разных слоев (4 столбец). Величина ошибки  $\Delta D_k = 0.01\lambda_0$  для каждого  $k$ -слоя. Смещение центра тяжести спектра определяется как:

$$\Delta\lambda_i = \bar{\lambda} - \lambda_i = \frac{1}{\sum_i T(\lambda)} \sum_i \lambda_i T_i \quad (4.4.1)$$

Сравнение данных в таблице 4.4.1, показывает следующее. Устойчивость, определенная по первой производной функции качества, практически нигде не соответствует реальной (столбец 5). Лучшие результаты дает устойчивость по второй производной (столбец 6), однако для некоторых слоев существуют количественные расхождения.

**Таблица 4.4.1.** Нормированное на максимальное значение смещение длины волны центра тяжести спектра с введенными ошибками в зависимости от разных слоев и устойчивость по разным критериям

Структура (подложка - кварц, среда - воздух)			$\Delta\lambda_{max}$ ( $\Delta D_k=0,025$ МКМ)	Устойчивость, нормированная на максимальное значение				
№ слоя	Вещество	Оптическая толщина, МКМ		$\frac{\partial F(x)}{\partial x_j}$	$\left(\frac{\partial^2 F(x)}{\partial D_j^2}\right)$	$\sum_{\Delta D \rightarrow 0} \left(\frac{\partial T}{\partial D_k}\right)$	$\Delta F_k / \Delta F_{k \max}$ при $\Delta D_k$ , МКМ	
							0.001	0.025
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	ZnSe	0.25	0.160	0.045	0.258	0.158	0.161	0.159
2	BaF <sub>2</sub>	То же	0.326	0.006	0.300	0.315	0.323	0.326
3	ZnSe	“	0.585	0.171	0.983	0.566	0.578	0.586
4	BaF <sub>2</sub>	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
5	ZnSe	0.25	0.596	0.155	0.994	0.575	0.589	0.596
6	BaF <sub>2</sub>	То же	0.342	0.024	0.324	0.336	0.344	0.342
7	ZnSe	“	0.207	0.090	0.345	0.208	0.209	0.207
8	BaF <sub>2</sub>	“	0.154	0.115	0.129	0.153	0.155	0.154
9	ZnSe	“	0.157	0.309	0.244	0.161	0.158	0.157
10	BaF <sub>2</sub>	“	0.238	0.311	0.189	0.235	0.239	0.238
11	ZnSe	“	0.407	0.938	0.579	0.383	0.407	0.408
12	BaF <sub>2</sub>	0.5	0.728	0.986	0.578	0.666	0.723	0.728
13	ZnSe	0.25	0.397	0.931	0.564	0.373	0.396	0.398
14	BaF <sub>2</sub>	То же	0.198	0.287	0.153	0.200	0.197	0.198
15	ZnSe	“	0.085	0.202	0.097	0.08	0.086	0.085

Рассмотрим устойчивость по критерию [113]. Расчет проводился по формуле (4.2.2) для бесконечно малой ошибки. Устойчивость по (4.2.2) дает количественное совпадение со сдвигом центра тяжести спектра. Однако при больших ошибках начинаются расхождения. Проанализируем этот результат.

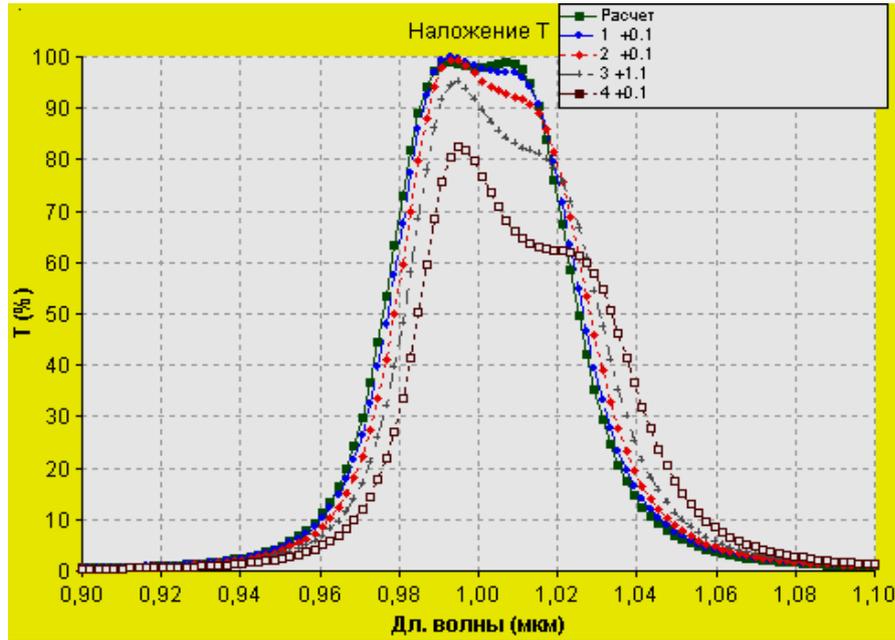
На рис. 4.4.2 представлена зависимость пропускания  $T$  от величины ошибки  $\Delta D_k$  для 12-ого слоя.

Анализ графика показывает, что функция устойчивости нелинейно зависит от введенной ошибки в толщине слоя. Для некоторых, наиболее критичных к ошибке слоев она имеет максимальную кривизну вблизи нуля. Фактически, это означает, что устойчивость по критерию [113] нельзя аппроксимировать на большие ошибки линейным образом. Как видно из таблицы 4.4.1, анализируемый критерий хорошо описывает качественно и количественно искажения спектров.

Проанализируем устойчивость по введенному нами критерию (4.2.1). Численные значения устойчивости для различных ошибок в слоях приведены в таблице 4.4.1 (столбцы 8 и 9), а гистограммы устойчивости представлены на рис. 4.4.3.

Из таблицы 4.4.1 и рис. 4.4.2 и рис. 4.4.3 видно, что при заданных малых ошибках введенные критерии по формулам (4.2.1-4.2.2) хорошо количественно описывают искажения в спектре интерференционного фильтра. Можно сделать вывод, что предложенная методика по формуле (4.2.1) дает согласующиеся с расчетом результаты сдвигов спектров пропускания.

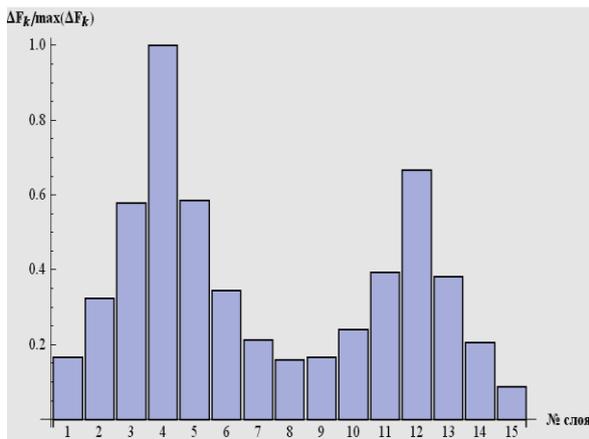
Данные гистограмм (см. рис. 4.4.3) и таблица 4.4.1 позволяют определить, какие изменения необходимо внести в толщины пленок, чтобы получить требуемую структуру или провести коррекцию при изготовлении покрытий. Коррекцию в слоях можно определить по таблице 4.4.1 или составить аналогичную для другой структуры. Анализ ошибок в спектрах показывает, что все ошибки в предыдущих слоях могут быть сведены к ошибке в  $z$ -слое, и для него легко рассчитать коррекцию в последующем –  $(z+v)>z$  слое, где  $v$  – целое число.



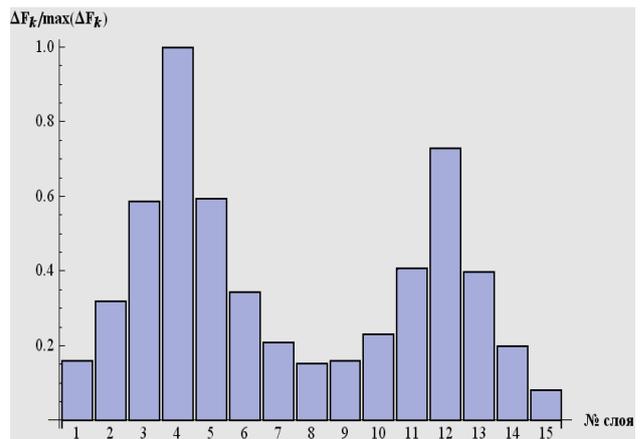
**Рис. 4.4.2.** Ошибка в толщине вводится в 12 слой 15-ти слойного полосового интерференционного фильтра

При расчете коррекции ошибок должно выполняться условие

$$\Delta D_{z+v} = -\frac{F_z}{F_{z+v}} \Delta D_z \tag{4.4.2}$$



(а)



(б)

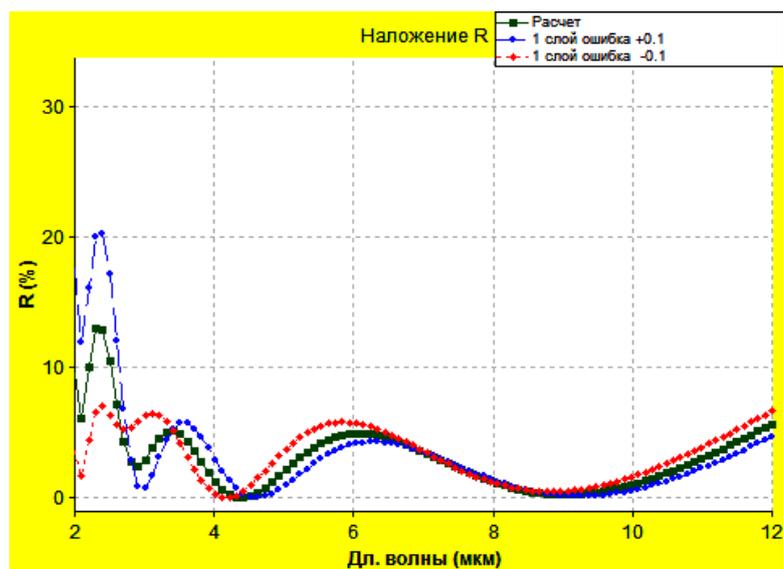
**Рис. 4.4.3.** Гистограммы устойчивости по слоям

(а) - ошибка в толщине  $0.001\lambda_0$ ; (б) - ошибка в толщине  $\pm 0.025\lambda_0$

Например, если в 12-й слой ввести ошибку  $D_{12} = 0.025\lambda_0$  мкм, то для компенсации искажений спектра можно использовать последующие слои, т.е. 13-й или 14-й. Если использовать 13-й слой, то его толщина должна быть в соответствии с формулой (4.4.2) уменьшена на  $D_{13} = 0.046\lambda_0$  мкм. Если в качестве компенсирующего использовать 14-й слой, то он должен быть уменьшен на  $D_{14} = 0.091\lambda_0$  мкм. Спектры структур с ошибкой в 12-ом слое, которая корректируется изменениями толщин в 13-м или 14-м слоях практически полностью совпадают со спектром исходной структуры и приведены на рис. 4.4.2.

#### 4.4.2. Ахроматическое просветляющее покрытие

В качестве следующего примера рассмотрим 5-ти слойное ахроматическое просветляющее покрытие на германии (Ge) в диапазоне от 2 до 12 мкм. Его структура и результаты расчетов по всем известным методикам приведена в таблице 4.4.2. На рис. 4.4.4 приведены спектры отражения 5-ти слойного ахроматического просветляющего покрытия с ошибкой в толщине  $\pm 0.1\lambda_0$  в 1-м слое.

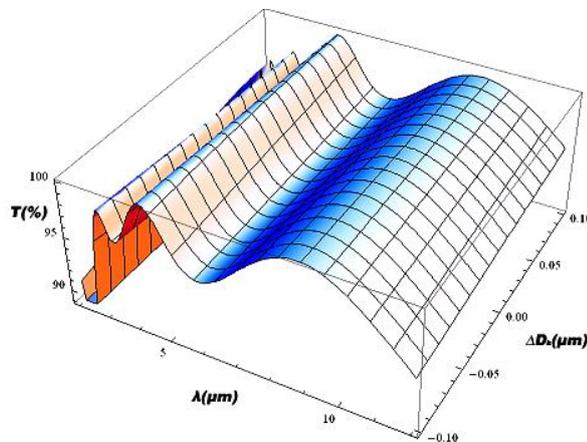


**Рис. 4.4.4.** Спектры отражения 5-ти слойного ахроматического просветляющего покрытия с ошибкой в толщине  $\pm 0.1\lambda_0$  в 1-ом слое.

**Таблица 4.4.2.** Нормированное на максимальное значение смещение длины волны центра тяжести спектра с введенными ошибками в зависимости от разных слоев и устойчивость по разным критериям

Структура (подложка - германий, среда – воздух)			$\Delta\lambda_{max}$ ( $\Delta D_k=0.1$ мкм)	Устойчивость, нормированная на максимальное значение				
№ слоя	Вещество	Оптическая толщина мкм		$\frac{\partial F(x)}{\partial x_j}$	$\left(\frac{\partial^2 F(x)}{\partial D_j^2}\right)$	$\sum_{\Delta D \rightarrow 0} \left(\frac{\partial T}{\partial D_k}\right)$	$\Delta F_k / \Delta F_{k \max}$ при $\Delta D_k$ , мкм	
							0.001	$\pm 0.1$
1	2	3	4	5	6	7	8	10
1	BaF <sub>2</sub>	0.940	0.430	0.013	0.111	0.434	0.433	0.443
2	PbF <sub>2</sub>	0.660	0.498	0.008	0.169	0.503	0.503	0.510
3	ZnS	1.100	0.448	0.087	0.137	0.454	0.453	0.476
4	Ge	0.245	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
5	ZnSe	0.328	0.895	0.344	0.439	0.852	0.852	0.870

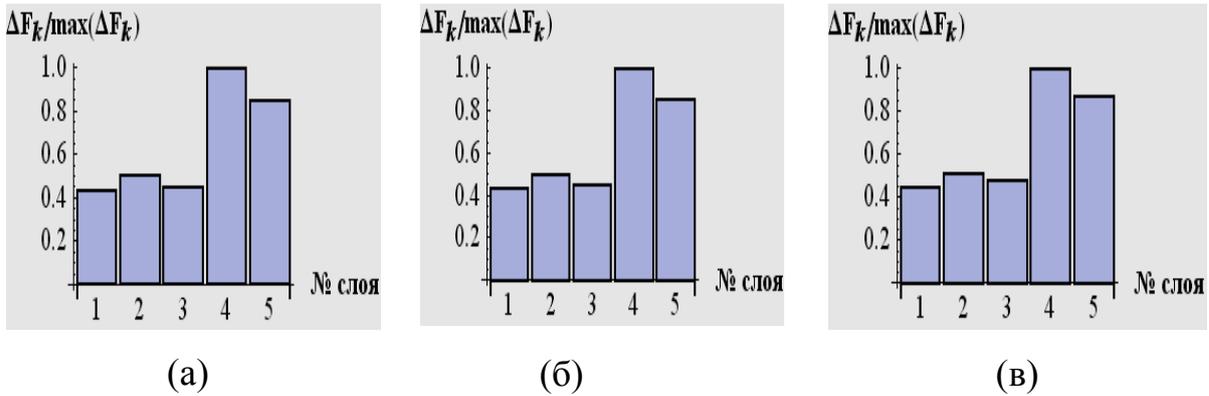
На рисунке 4.4.5 представлен 3D-график, из которого видно, что отрицательные и положительные ошибки практически одинаково влияют на искажения спектров.



**Рис.4.4.5.** 3D-график спектра пропускания 5-ти слойного ахроматического просветляющего покрытия.

Численные значения устойчивости для различных ошибок в толщинах слоев приведены в таблице 4.4.2 (столбцы 8-10), а гистограммы устойчивости представлены на рис. 4.4.6. Дополнительно, для сравнения была рассчитана функция качества  $F$ .

Данные в таблице 4.4.2 и рис. 4.4.4 – 4.4.6 показывают, что устойчивость, определенная по первой и второй производной (столбцы 5–6) дают количественные расхождения. Из гистограмм видно, что устойчивость по критерию (4.2.2) (столбец 7) и введенный нами критерий (4.2.1) (столбцы 8–10) дают хорошие результаты для любых видов ошибок.



**Рис. 4.4.6.** Гистограммы устойчивости по слоям.

- (а) – ошибка в толщине  $0.001\lambda_0$  мкм; (б) – ошибка в толщине  $0.1\lambda_0$  мкм;  
 (в) – ошибка в толщине  $-0.1\lambda_0$  мкм

В приведенном примере функция качества также не коррелирует с функциями устойчивости. В целом можно сделать вывод, что ахроматические просветляющие покрытия можно достаточно хорошо анализировать на устойчивость с использованием критериев (4.2.1 – 4.2.2).

### 4.4.3. Светоделительное покрытие

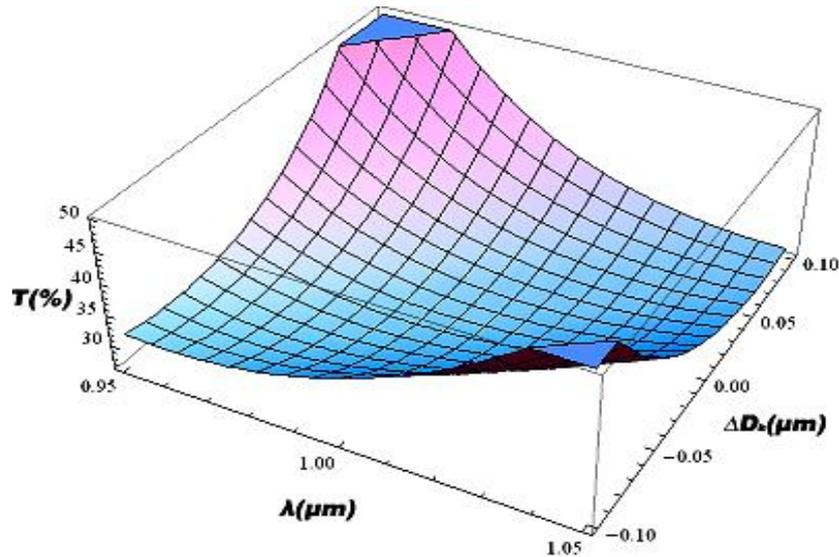
В качестве последнего примера проведем анализ светоделительного покрытия с коэффициентом отражения 70% в диапазоне от 0.95 до 1.05 мкм. Его

структура и результаты расчетов критериев устойчивости приведены в таблице 4.4.3, а спектр – рис. 4.4.7. Здесь же приведены значения функции качества (столбцы 4, 5) с положительными и отрицательными ошибками  $\Delta D_k$ , которые мы использовали в качестве критерия для сравнительного анализа. В качестве эталонного спектра взято значение среднего коэффициента пропускания  $T = 0.30\%$ .

На рис. 4.4.8 представлен 3D-график спектра пропускания 7-и слойного светоделительного покрытия. На рис. 4.4.9 приведены спектры структуры без ошибок и с ошибками в 5-м и 7-м слоях разных знаков.

**Таблица 4.4.3.** Нормированные на максимальное значение функции устойчивости  $F(X)$  спектроделительного покрытия по разным критериям с введением ошибок разных знаков

Структура (подложка - кварц, среда - воздух)			$\Delta\lambda_{\max}$		Устойчивость, нормированная на максимальное значение					
№ слоя	Вещество	Оптическая толщина, мкм	$\Delta D_k=0.075$ , мкм	$\Delta D_k=-0.075$ , мкм	$\frac{\partial F(x)}{\partial x_j}$	$\left(\frac{\partial^2 F(x)}{\partial D_j^2}\right)$	$\sum_{\Delta D \rightarrow 0} \left(\frac{\partial T}{\partial D_k}\right)$	$\Delta F_k / \Delta F_{k \max}$ при $\Delta D_k$ , мкм		
								0.01	0.075	-0.075
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	ZnSe	0.780	0.700	0.500	0.194	0.629	0.747	0.713	0.650	0.545
2	SiO	0.158	0.671	0.839	0.491	0.629	0.873	0.786	0.526	0.840
3	ZnSe	0.303	0.841	0.505	0.890	0.790	0.816	0.789	0.834	0.492
4	SiO	0.363	0.765	0.459	0.419	0.551	0.769	0.755	0.788	0.441
5	ZnSe	0.076	0.641	1.000	1.000	1.000	1.000	0.873	0.438	1.000
6	SiO	0.230	0.518	0.403	0.396	0.414	0.594	0.569	0.490	0.432
7	ZnSe	0.378	1.000	0.444	0.493	0.943	0.974	1.000	1.000	0.282



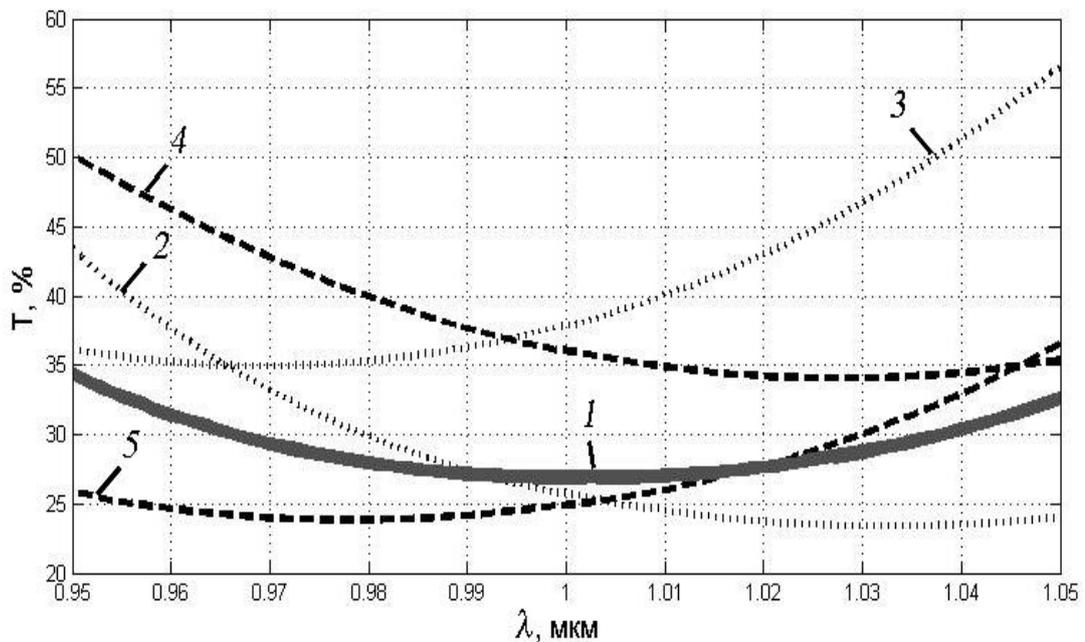
**Рис. 4.4.8.** 3D-график спектра пропускания 7-ми слойного светоделительного покрытия

Данные в таблице 4.4.3 показывают, что устойчивость, определенная по первой и второй производным функции качества (столбцы 6–7) и по производной от спектра пропускания (столбец 8) дают принципиальные количественные расхождения с критерием (4.2.2) (столбцы 9–11). Для сравнения была рассчитана функция качества  $F$  (столбцы 4,5), которая дала более близкие значения с введенным критерием (4.2.1). Это связано с тем, что ошибки разных знаков (не учитываемые в критериях (4.1.5 – 4.1.6) и (4.2.2))

Для анализа результатов рассмотрим спектры с ошибками в толщинах 5-ого и 7-ого слоя. Ошибки 0.075 взяты с разными знаками. Максимальное различие функций устойчивости означает, что эти слои будут иметь максимальную разность отклонений спектров от заданной структуры. На рис.4.4.9 приведены спектры пропускания исходной структуры с введенными ошибками в 5-м и 7-м слоях.

Из анализа спектров видно, наилучшее соответствие с критериями устойчивости для 5-го и 7-го слоев дает наш критерий (4.2.1). Близкие значения к критерию (4.2.1) получаются и для функции качества. При этом видно, что изменение знака ошибки дает существенное различие в спектрах. Устойчивость

по критерию (4.2.2) для малой ошибки (столбец 7) дает хорошие результаты. С увеличением ошибки возникают принципиальные расхождения всех (кроме нашего) критериев устойчивости и функции качества, так как начинаются расхождения с расчетными сдвигами. Слой 7-й, который имел максимальное значение критерия, при смене знака ошибки, становится минимальным. То же самое проявляется для 3-го и 4-го слоев. Для анализа причин этих различий, рассмотрим графики зависимости устойчивости от введенных ошибок по нашей методике. На рис. 4.4.10–4.4.13 приведены графики зависимости устойчивости по нашему критерию от величины ошибки.



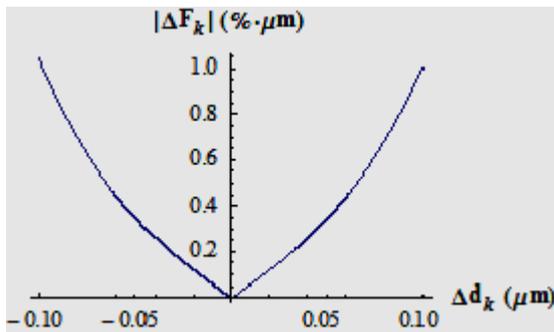
**Рис. 4.4.9.** Спектры пропускания 7-слойного светоделительного покрытия структуры без ошибок и с ошибками в 5-м и 7-м слоях разных знаков.

- 1 – спектр исходной структуры;
- 2 – спектр структуры с ошибкой в толщине в 5 слое +0.075;
- 3 – спектр структуры с ошибкой в толщине в 5 слое -0.075;
- 4 – спектр структуры с ошибкой в толщине в 7 слое +0.075;
- 5– спектр структуры с ошибкой в толщине в 7 слое -0.075

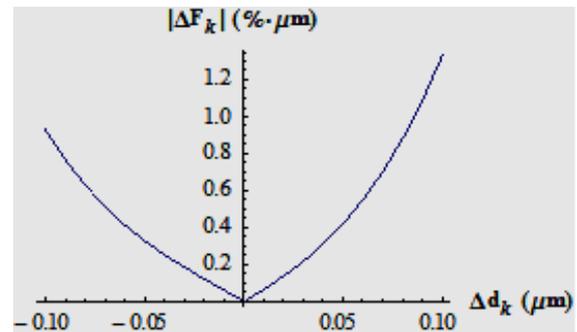
На рис. 4.4.14 приведены гистограммы устойчивости по слоям. Из анализа графиков (см. рис.4.4.10–4.4.13) и гистограмм (см. рис. 4.4.14) видно, что ошибки разного знака могут давать существенные различия в некоторых слоях.

Для 1-го и 3-го слоев  $\Delta F_k$  симметрична относительно знака ошибки. Для 5-го и 7-го слоев она ассиметрична. Другими словами, изменение знака ошибки должно привести к существенному изменению критерия устойчивости.

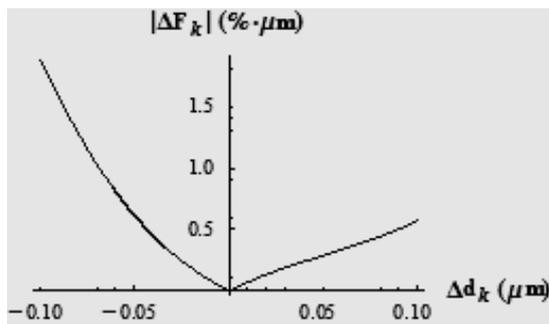
В отличие от первого примера (полосовой интерференционный фильтр), коррекция спектров с помощью одной из последующих пленок невозможна. Для нее необходимо использовать не менее двух последующих слоев.



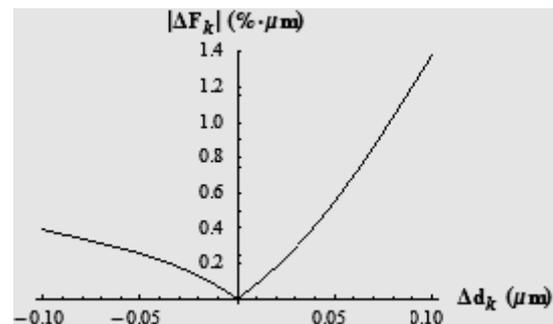
**Рис.4.4.10.** Зависимость устойчивости для 1-го слоя



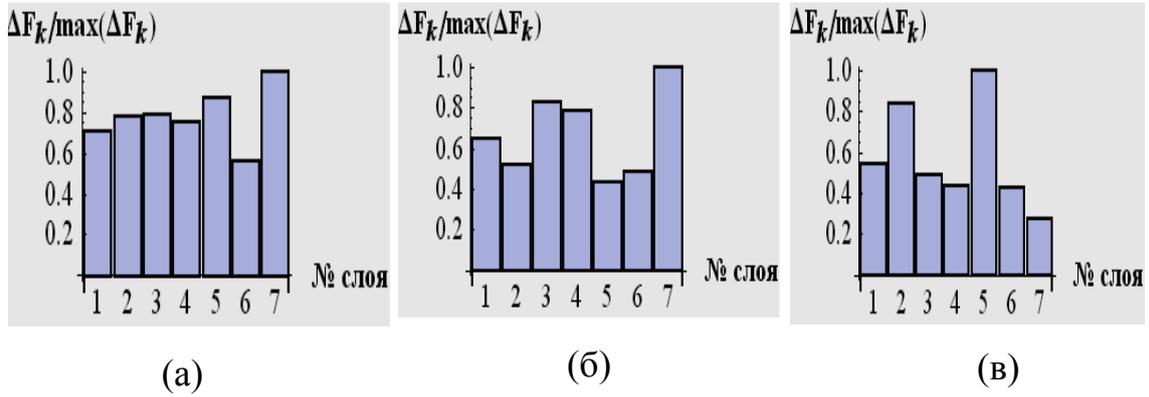
**Рис. 4.4.11.** Зависимость устойчивости для 3-го слоя



**Рис. 4.4.12.** Зависимость устойчивости для 5-го слоя



**Рис. 4.4.13.** Зависимость устойчивости для 7-го слоя



**Рис. 4.4.14.** Гистограммы устойчивости по слоям.

- (а) – ошибка в толщине  $0.01\lambda_0$  мкм;
- (б) – ошибка в толщине  $0.075\lambda_0$  мкм;
- (в) – ошибка в толщине  $-0.075\lambda_0$  мкм

Сравнительный анализ позволяет сделать вывод, что введенный нами критерий дает наилучшее согласие с изменением спектров при введении ошибок в толщинах слоев. Все остальные критерии в некоторых случаях дают принципиальное разногласие со спектрами.

## ГЛАВА 5. АХРОМАТИЧЕСКИЕ ПРОСВЕТЛЯЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ СРЕДНЕЙ ИК ОБЛАСТИ СПЕКТРА

Просветляющие покрытия являются важными составляющими оптических систем, состоящих из большого количества линз или других оптических компонентов. Основная задача ПП – уменьшение остаточного отражения от поверхности подложки, на которую нанесено ПП. Просветляющие покрытия являются самыми распространенными покрытиями оптических систем, и интерес к изучению этих покрытий постоянно растет.

Особенностью проектирования ПП является использование в них материалов с минимальным показателем преломления и поглощения. Широкое применение во всех диапазонах спектра находят пленки фторидов, которые прозрачны до 12-15 мкм [126-131].

Однако, в некоторых случаях, при использовании оптических приборов в полевых условиях фториды не могут применяться в качестве пленки граничащей с воздухом, так как они недостаточно тверды и гигроскопичны. Поэтому нами был проведен синтез покрытий на германиевой подложке в окнах прозрачности атмосферы 3-5 мкм и 8-12 мкм с использованием твердых и негигроскопичных материалов, таких как оксид кремния (SiO) и германия (Ge).

В настоящей главе рассмотрена методика синтеза ПП, базирующаяся на эквивалентных структурах (см. п. 3.2). Ее реализация обеспечивается разработанным программным обеспечением Film Manager, которая позволяет выбирать из базы данных требуемые пленкообразующие материалы и их толщины для получения эквивалентной структуры.

Поэтапный процесс синтеза ПП, включает: выбор начального приближения в виде равнотолщинных пленок, оптимизацию по показателям преломления слоев, замену слоев эквивалентными комбинациями и оптимизацию ПП по толщинам слоев, расчет функции качества и функции устойчивости [128].

Некоторые из синтезированных просветляющих покрытий реализованы на практике на предприятиях НИИ «Гириконд» и ООО «Тидекс».

При выборе начального приближения использованы результаты, основанные на нахождении непрерывного распределения показателя преломления слоев с помощью преобразований Фурье, которые обеспечивают получение заданной спектральной характеристики [2, 71, 83-85]. Недостаток этого класса методов заключается в сложности практической реализации рассчитанных покрытий, а также в их неприменимости для неупрощенного критерия качества. Поэтому в качестве начального приближения использовались равнотолщинные слои покрытия со ступенчатым распределением с последовательно уменьшающимися от подложки показателями преломления [22]. Роль обрамляющей среды играл воздух с показателем преломления  $n_0=1$ .

Нами проведен синтез ахроматических просветляющих покрытий с использованием новых и известных пленкообразующих материалов. Ниже будут рассмотрены просветляющие покрытия на подложках из Ge, ZnSe и Si в средней ИК области спектра.

### **5.1. Методика синтеза просветляющих покрытий**

В данной работе синтез просветляющих покрытий (ПП) проводится в несколько этапов. На первом этапе задается начальное приближение. Для подложек с высоким показателем преломления в его основе лежит структура из слоев с последовательно уменьшающимися от подложки показателем преломления. Число слоев и их толщины задаются требуемым спектральным диапазоном просветления  $\lambda_{max} - \lambda_{min}$  и средним значением коэффициента отражения в указанной области спектра.

В работе [132] предложено использовать для получения ПП следующие эмпирические выражения. Число слоев  $N$  в первом приближении можно определить как:

$$N = \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{\lambda_{\min}} \quad (5.1.1)$$

В зависимости от требований к остаточному коэффициенту отражения число слоев  $N$  может быть увеличено (на 1-3 слоя). С увеличением числа слоев среднее отражение уменьшается, так же уменьшается отражение в пиках.

Средняя толщина этих слоев  $d_{cp}$  в первом приближении определяется из уравнения:

$$\frac{1}{d_{cp}} = 2 \left( \frac{1}{\lambda_{\max}} + \frac{1}{\lambda_{\min}} \right) \quad (5.1.2)$$

Наконец, показатель преломления  $n_i$  слоя  $i$  (нумерация от подложки) можно задать как:

$$n_i = n_s - i \left( \frac{n_s - n_{\min}}{N} \right) \quad (5.1.3)$$

Уравнения (5.1.1-5.1.3) позволяют задать начальное приближение при синтезе просветляющего покрытия на подложке с высоким показателем преломления.

Начальная структура оптимизируется по показателям преломления и толщинам с помощью модернизированной программы Film Manager. При оптимизации используется минимизация функция качества с помощью двух алгоритмов: случайного перебора с переменным шагом поиска и квадратичной аппроксимации Пауэлла. Использование двух алгоритмов позволяет снизить вероятность попадания в локальный экстремум. В итоге находится структура пленок в первом приближении с произвольными значениями показателей преломления и толщинами.

Вариации параметров из уравнений (числа слоев  $N$ , показателей преломления) в начальном приближении приводят к нахождению ряда решений с различными значениями функции качества.

На следующем этапе для выбранного решения проводится замена слоев с произвольными значениями показателей преломления на эквивалентные трехслойные структуры из реально существующих материалов. Этот процесс был введен в разработанную программу Film Manager.

Для получения наилучшего соответствия необходимо в трехслойной эквивалентной структуре использовать показатели преломления реальных пленкообразующих материалов мало отличающихся от заданных в ней. Если часть слоев в исходной структуре имеет показатели преломления близкие к имеющимся в базе данных, то они просто могут быть заменены ими. В качестве слоя с минимальным коэффициентом отражения используем перспективные пленкообразующие материалы ( $98\% \text{BaF}_2 + 2\% \text{MgF}_2$  или  $67\% \text{YF}_3 + 33\% \text{BaF}_2$ ) [126 - 131].

Полученные решения также оптимизируются по толщинам пленок путем минимизации функции качества с помощью программы Film Manager.

Соответствие синтезированного покрытия к требуемым спектральным характеристикам, не означает, что структура будет устойчива к вариациям толщин слоев. Поэтому после оптимизации проводился анализ устойчивости найденных решений по методике, описанной в [118-126]. После анализа устойчивости определяется окончательная структура.

## **5.2. Просветляющие покрытия на кремнии**

В настоящей работе синтезированы и реализованы просветляющие покрытия (ПП) на кремнии в диапазоне от 2 до 12 мкм по методике описанной разделе 5.1.

Как уже упоминалось выше, для того, чтобы не попасть в локальный экстремум, осуществляя оптимизацию оптического покрытия, необходимо при поиске минимума функции качества использовать два алгоритма: случайный перебор с переменным шагом поиска и квадратичную аппроксимацию Пауэрлла.

В качестве подложки мы использовали кремний марки КЭФ-4.5. Далее синтезировали равнотолщинные покрытия. Пленкообразующими материалами служили германий, селенид цинка или сульфид цинка и  $\text{BaF}_{0.98}\text{Mg}_{0.02}\text{F}_2$ . Роль обрамляющей среды играл воздух с  $n_0=1$ . Отсчет слоев покрытия везде ведется от подложки.

На первом этапе находим начальное приближение по формулам (5.1.1-5.1.3). Оптические толщины слоев покрытий равны  $\lambda_0/4$ . Для получения качественного ПП требуется рассмотреть в качестве последнего слоя пленку с минимальным коэффициентом отражения, в нашем случае использовался пленкообразующий материал  $\text{BaF}_{0.98}\text{Mg}_{0.02}\text{F}_2$ . В соответствии с этим в качестве начального приближения берем структуры, представленные в таблице 5.2.1. Далее проводится оптимизация с помощью программы Film Manager и находятся оптимизированные начальные приближения. Эта последовательность проделывалась для двух структур: 6-ти и 7-ми слойных просветляющих покрытий. Толщины указаны в долях  $\lambda_0/4$ , где  $\lambda_0=3.0$  мкм для 6-ти слойной структуры и  $\lambda_0=1.0$  мкм для 7-ми слойной структуры. ( $\lambda_0$  - опорная длина волны при расчете на нашей программе).

Задача синтеза неоднозначна, поэтому можно получить ряд покрытий для 6-ти и 7-ми слойных покрытий, которые нуждаются в проверке на устойчивость. Для получения численного значения критерия устойчивости использовалась методика, описанная авторами в [118-122]. Также с помощью программы Film Manager была рассчитана функция качества для исследуемых структур. В таблице 5.2.1 приведены структуры ПП на подложках из кремния на ранних этапах конструирования, а также рассчитаны функции качества и критерий устойчивости для 6-ти и 7-ми слойных покрытий.

После того, как мы оптимизировали базовые структуры по функции качества и анализу устойчивости, приступаем к замене слоев базовой структуры на эквивалентные слои.

Эквивалентные слои применяются тогда, когда используемый в базовой структуре показатель преломления не существует в природе. Но его можно создать искусственным путем, заменяя слой с несуществующим показателем преломления на структуру LHL (низкий-высокий-низкий) или HLH (высокий-низкий-высокий). Замена на эквивалентные слои, проводилась с помощью программы Film Manager.

**Таблица 5.2.1.** Структуры ПП на подложках из Si на первых этапах синтеза

Кол-во слоев	№ слоя	Начальное приближение		Оптимизированное нач. приближение		Функция качества	Критерий устойчивости
		$n$	$d, \lambda/4$	$n$	$d, \lambda/4$		
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
6-ти слойная структура	1	3.2	1	3.246	0.356	0.955	118.067
	2	2.8	1	2.909	0.394		
	3	2.4	1	2.448	0.465		
	4	2.0	1	1.975	0.572		
	5	1.6	1	1.576	0.675		
	6	1.35	1	1.350	0.948		
7-ми слойная структура	1	3.2	1	3.556	0.876	0.917	113.049
	2	3.0	1	3.401	0.327		
	3	2.8	1	3.035	0.372		
	4	2.4	1	2.533	0.447		
	5	2.0	1	2.019	0.560		
	6	1.6	1	1.592	0.674		
	7	1.35	1	1.350	0.945		

В таблице 5.2.2 представлены эквивалентные конструкции с различным числом слоев. При переходе к окончательной (рабочей) структуре соседние слои могут оказаться из одного материала. В этом случае они объединяются в один слой. В качестве эквивалентной нами была использована структура LHL для 6-ти слойной и для 7-ми слойной структуры.

Таблица 5.2.2. Эквивалентные конструкции с различным числом слоев

Кол-во слоев	№ слоя	Оптимизированное начальное приближение		Эквивалентные структуры			
		$n$	$d, \lambda/4$	материал	$d, \lambda/4$	материал	$d, \lambda/4$
1	2	3	4	5	6	7	8
6-ти слойная структура	1	3.246	0.356	ZnSe Ge ZnSe	0.833 1.538 0.833	ZnSe Ge	0.833 1.538
	2	2.909	0.394	ZnSe Ge ZnSe	1.208 1.127 1.208	ZnSe Ge	2.041 1.127
	3	2.448	0.465	ZnSe	4.181	ZnSe	5.389
	4	1.975	0.572	BaF <sub>0.98</sub> Mg <sub>0.02</sub> F <sub>2</sub> ZnSe BaF <sub>0.98</sub> Mg <sub>0.02</sub> F <sub>2</sub>	1.232 2.681 1.232	BaF <sub>0.98</sub> Mg <sub>0.02</sub> F <sub>2</sub> ZnSe	1.232 2.681
	5	1.576	0.675	BaF <sub>0.98</sub> Mg <sub>0.02</sub> F <sub>2</sub> ZnSe BaF <sub>0.98</sub> Mg <sub>0.02</sub> F <sub>2</sub>	2.742 0.595 2.742	BaF <sub>0.98</sub> Mg <sub>0.02</sub> F <sub>2</sub> ZnSe	3.974 0.595
	6	1.350	0.948	BaF <sub>0.98</sub> Mg <sub>0.02</sub> F <sub>2</sub>	8.534	BaF <sub>0.98</sub> Mg <sub>0.02</sub> F <sub>2</sub>	11.27
7-ми слойная структура	1	3.556	0.876	Ge ZnS Ge	2.813 2.262 2.213	Ge ZnS	2.813 2.262
	2	3.401	0.327	Ge ZnS Ge	0.901 1,136 0.901	Ge ZnS	3.714 1.136
	3	3.035	0.372	Ge ZnS Ge	0.632 2.086 0.632	Ge ZnS	1.533 2.086
	4	2.533	0.447	ZnS	4.022	Ge ZnS	0.632 6.055
	5	2.019	0.560	ZnS BaF <sub>0.98</sub> Mg <sub>0.02</sub> F <sub>2</sub> ZnS	2.033 0.972 2.033	BaF <sub>0.98</sub> Mg <sub>0.02</sub> F <sub>2</sub> ZnSe	0.972 2.409
	6	1.592	0.674	ZnS BaF <sub>0.98</sub> Mg <sub>0.02</sub> F <sub>2</sub> ZnS	0.376 5.316 0.376	BaF <sub>0.98</sub> Mg <sub>0.02</sub> F <sub>2</sub> ZnS	5.316 0.376
	7	1.350	0.945	BaF <sub>0.98</sub> Mg <sub>0.02</sub> F <sub>2</sub>	8.507	BaF <sub>0.98</sub> Mg <sub>0.02</sub> F <sub>2</sub>	8.507

В таблице 5.2.3 приведены окончательные конструкции ПП на основе пленок Ge, ZnSe или ZnS,  $BaF_{0.98}Mg_{0.02}F_2$  и рассчитаны функция качества и критерий устойчивости для каждой из них.

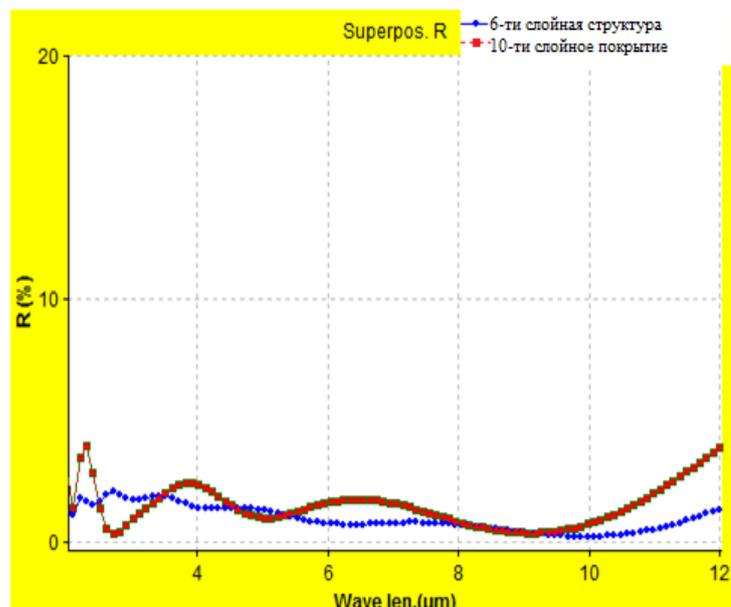
**Таблица 5.2.3.** Конструкции ПП на основе пленок Ge, ZnSe или ZnS,  $BaF_{0.98}Mg_{0.02}F_2$

Покрытие	№ слоя	Оптимизированное эквивалентное покрытие		Функция качества	Критерий устойчивости
		материал	$d, \lambda/4$		
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
10-ти слойное покрытие	1	ZnSe	0.100	5.319	1041.53
	2	Ge	0.116		
	3	ZnSe	0.224		
	4	Ge	0.100		
	5	ZnSe	0.100		
	6	$BaF_{0.98}Mg_{0.02}F_2$	0.100		
	7	ZnSe	0.374		
	8	$BaF_{0.98}Mg_{0.02}F_2$	0.293		
	9	ZnSe	0.147		
	10	$BaF_{0.98}Mg_{0.02}F_2$	0.970		
13-ти слойное покрытие	1	Ge	0.1	4.409	850.343
	2	ZnS	0.207		
	3	Ge	0.157		
	4	ZnS	0.280		
	5	Ge	0.276		
	6	ZnS	0.683		
	7	Ge	0.224		
	8	ZnS	2		
	9	$BaF_{0.98}Mg_{0.02}F_2$	0.821		
	10	ZnS	0.499		
	11	$BaF_{0.98}Mg_{0.02}F_2$	1.003		
	12	ZnS	0.1		
	13	$BaF_{0.98}Mg_{0.02}F_2$	2.0		

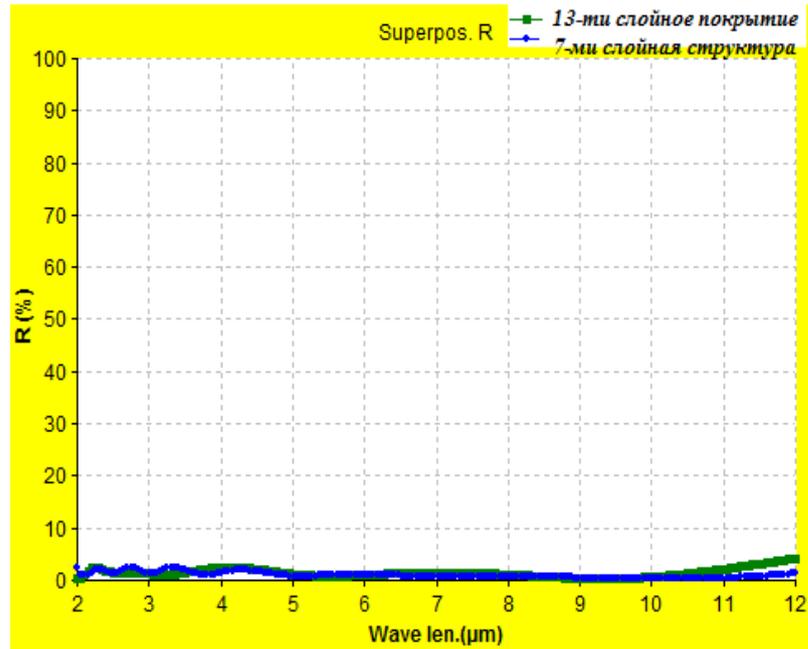
Функция качества и критерий устойчивости характеризуют отклонение найденного решения от заданных спектральных характеристик. Чем функция качества меньше, тем спектральные характеристики найденного решения ближе к требуемым. Чем ниже критерий устойчивости, тем менее чувствительна структура покрытия к ошибкам в толщинах слоев.

На рис.5.2.1 и рис. 5.2.2 приведены спектральные характеристики начального приближения и реальной структуры (оптимизированной эквивалентной структуры).

Из полученных результатов видно, что спектральные характеристики начальной структуры почти совпадают со структурой, в которых несуществующие в природе показатели преломления заменялись эквивалентными слоями (реально существующих материалов). Полученные спектральные характеристики не совпадают со спектральными характеристиками базовых структур в областях 3.0-3.6 мкм и более 9 мкм. Это обусловлено имеющимся в этих областях поглощением.



**Рис.5.2.1.** Спектральные характеристики начальной 6-ти слойной структуры и оптимизированной эквивалентной структуры для 10-ти слойного покрытия



**Рис.5.2.2.** Спектральные характеристики начальной 7-ти слойной структуры и оптимизированной эквивалентной структуры для 13-ти слойного покрытия

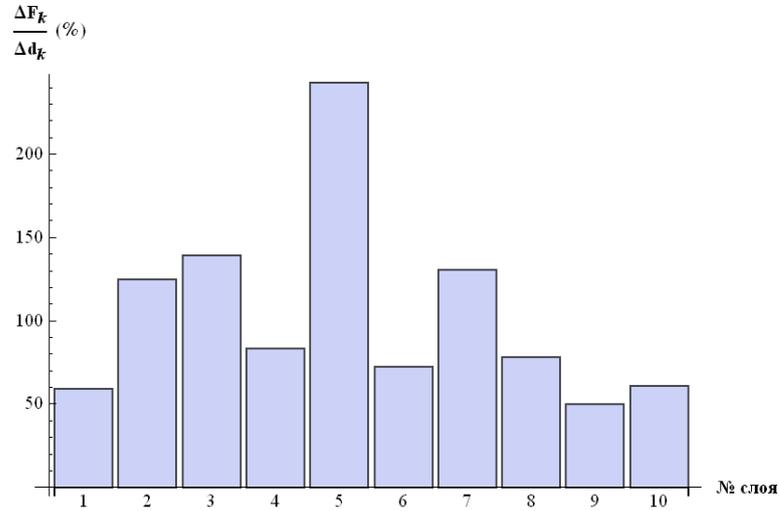
На рис. 5.2.3 и рис. 5.2.4 приведены гистограммы устойчивости оптимизированных эквивалентных структур по слоям с ошибкой в толщине  $0.1\lambda_0$ . Из рис. 5.2.3 и рис. 5.2.4 видно, что в среднем устойчивость отдельных слоев для 13-ти слойной структуры выше, чем для 10-ти слойной. Кроме того, в 10-ти слойной структуре существует слой (пятый), ошибка в котором может сильно сказаться на конечном результате.

Десятислойное покрытие было реализовано на практике на предприятии ОАО «НИИ «Гириконд». На рис. 5.2.5 приведены экспериментальный и теоретический (синтезируемое покрытие, представленное в таблице 5.2.2) спектры пропускания и отражения от двух граней подложки с нанесенными ПП.

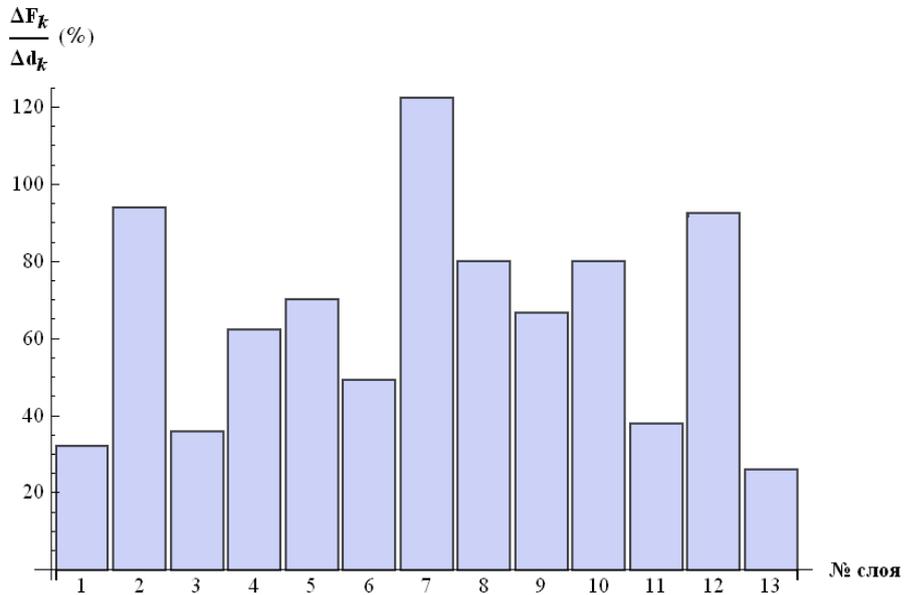
При расчетах учитывалось поглощение, как в подложке, так и в пленке.

Из рис. 5.2.5 видно, что отличие спектров, расчетной структуры от реализованной, на наш взгляд, объясняется избыточным поглощением в комбинации реализованной пленки  $\text{BaF}_{0.98}\text{Mg}_{0.02}\text{F}_2\text{-ZnSe}$ . Механизмом

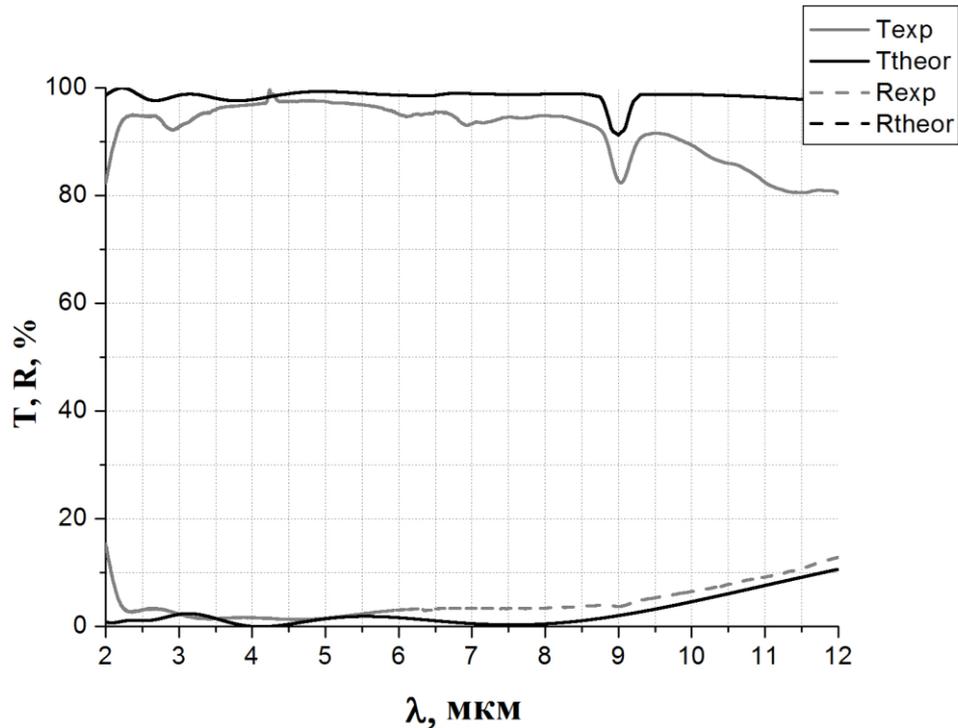
избыточного поглощения является взаимная диффузия материалов пленок друг к другу при напылении.



**Рис. 5.2.3.** Гистограмма устойчивости по слоям с ошибкой в толщине  $0.1\lambda_0$  для 10-ти слойного покрытия



**Рис. 5.2.4.** Гистограмма устойчивости по слоям с ошибкой в толщине  $0.1\lambda_0$  для 13-ти слойного покрытия



**Рис. 5.2.5.** Спектры синтезированного и реализованного покрытий на основе пленок Ge, ZnSe,  $\text{BaF}_{0.98}\text{Mg}_{0.02}\text{F}_2$  на подложке Si

В заключение отметим, что рассмотренная методика синтеза просветляющих покрытий на основе эквивалентных слоев позволяет получать реализуемые на практике покрытия с минимальным числом слоев. На основе предложенной методики были синтезированы просветляющие покрытия для подложки из кремния. Покрытия анализировались на устойчивость и были выявлены слои, наиболее критичные к ошибкам в толщине. На практике было реализовано 10-ти слойное покрытие со средним отражением от одной поверхности менее 3% в диапазоне спектра 2-12 мкм.

### **5.3. Просветляющие покрытия на германии**

Германий (Ge) – один из наиболее широко применяемых оптических материалов для ИК области, который обладает высоким показателем преломления. На поверхность оптики из германия может быть нанесено

антиотражающее покрытие в виде алмазной пленки, которое позволяет сделать оптическую поверхность очень твердой и жесткой.

Область прозрачности Ge лежит в диапазоне от 2 до 20 мкм, пропускание после 14 мкм падает. В соответствие с этим просветляющие покрытия на германии бывают различных типов: одноволновые (на одну длину волны), полосовые (на небольшой спектральный диапазон  $N = \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{\lambda_{\min}}$ , т.е.  $N=2$ ) и широкополосные ( $N=3 - 7$ ).

Рассмотрим проектирование просветляющего покрытия для диапазона спектра 2-12 мкм с внедрением полученной смеси  $Y_{0.67}Ba_{0.33}F_{2.67}$ . Процедура синтеза аналогична, как и в пункте 5.2. В указанном диапазоне спектра синтезировалось и реализовывалось широкополосное (ахроматичное) покрытие в области 2-12 мкм, в котором Ge имеет малое поглощение.

В таблице 5.3.1 представлена структура просветляющего покрытия для 7-ми слоев на первых этапах конструирования, а также рассчитаны функция качества и критерий устойчивости.

**Таблица 5.3.1.** Структура ПП на подложке из Ge на первых этапах синтеза

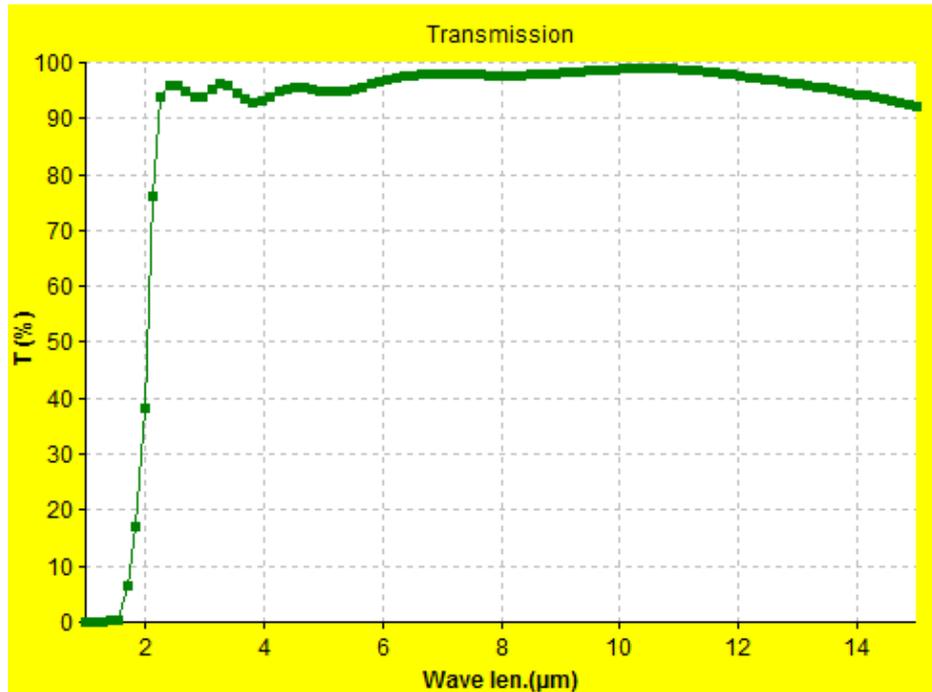
Кол-во слоев	№ слоя	Начальное приближение		Оптимизированное нач. приближение		Функция качества $F$	Критерий устойчивости $\sum_k (\Delta F_k / \Delta d_k)$
		$n$	$d, \lambda/4$	$n$	$d, \lambda/4$		
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
7-ми слойная структура	1	3.6	1	3.836	6.709	0.904	141.592
	2	3.2	1	3.613	1.158		
	3	2.8	1	3.177	1.139		
	4	2.4	1	2.613	1.137		
	5	2	1	2.056	1.131		
	6	1.6	1	1.605	1.076		
	7	1.35	1	1.350	1.271		

На следующем этапе синтеза пленки, показатели преломления, которых не имелись в базе данных, заменялись на трехслойные структуры (Ge, ZnS,  $Y_{0.67}Ba_{0.33}F_{2.67}$ ) с показателями преломления большими и меньшими, чем требуемые. На последнем этапе после замены на эквивалентные структуры проводилась оптимизация по толщинам. Кроме того, некоторые слои сразу менялись на однослойные пленки с близкими показателями преломления. После этого снова проводилась оптимизация полученного покрытия. Окончательная конструкция представлена в таблице 5.3.2.

**Таблица 5.3.2.** Конструкции ПП на основе пленок Ge, ZnS,  $Y_{0.67}Ba_{0.33}F_{2.67}$

Покрытие	№ слоя	Оптимизированное эквивалентное покрытие		Функция качества	Критерий устойчивости
		материал	$d, \lambda/4$		
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
12-ти слойное покрытие	1	ZnS	0.115	3.643	928.257
	2	Ge	0.549		
	3	ZnS	0.163		
	4	Ge	0.243		
	5	ZnS	0.168		
	6	Ge	0.358		
	7	ZnS	0.517		
	8	Ge	0.222		
	9	ZnS	1.403		
	10	$Y_{0.67}Ba_{0.33}F_{2.67}$	0.500		
	11	ZnS	0.259		
	12	$Y_{0.67}Ba_{0.33}F_{2.67}$	1.357		

На рис. 5.3.4 представлен спектр оптимизированного эквивалентного покрытия на основе пленок Ge, ZnS,  $Y_{0.67}Ba_{0.33}F_{2.67}$ . Толщины указаны в долях  $\lambda_0/4$ , где  $\lambda_0 = 3.5$  мкм (опорная длина волны при расчете на нашей программе).



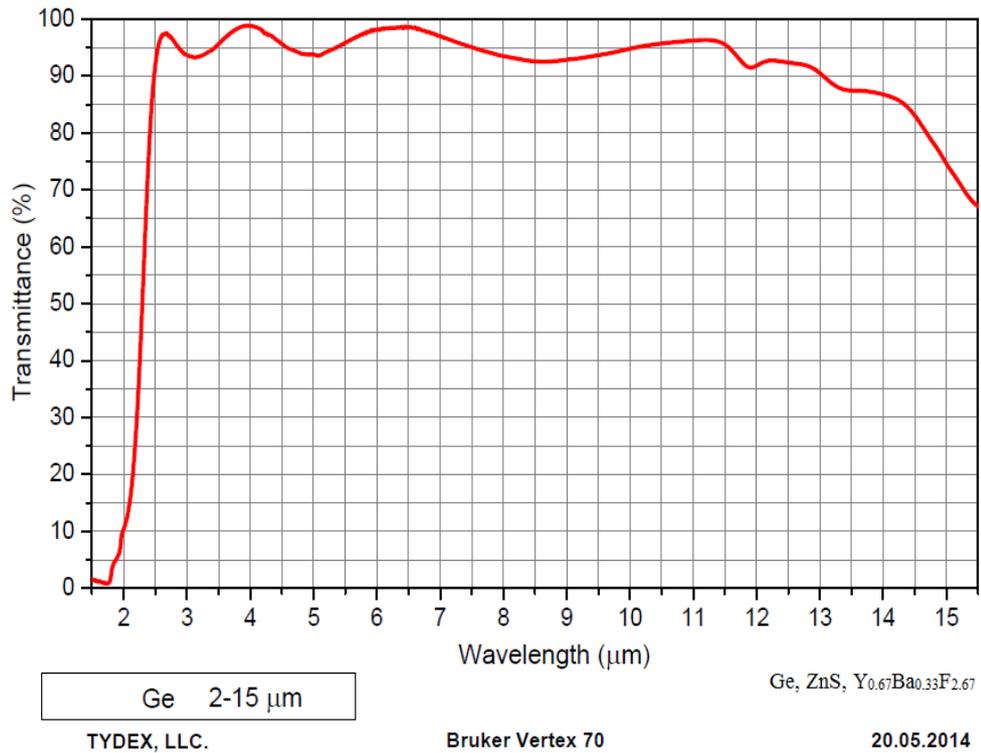
**Рис. 5.3.4.** Спектр оптимизированного эквивалентного покрытия на основе пленок Ge, ZnS,  $Y_{0.67}Ba_{0.33}F_{2.67}$  на подложке Ge

На рис. 5.3.5 приведено реализованное покрытие, которое изготавливалось в ООО «ТИДЕКС». Оно с точностью  $\pm 2\%$  совпадает с синтезированным покрытием. Небольшие отличия обусловлены ошибками в толщинах слоев при изготовлении. Полученное покрытие является широкополосным просветляющим покрытием с пропусканием от двух сторон более 95%. Оно обладает высокой механической прочностью (первая группа) и химической стойкостью. Синтезированные покрытия приведены в таблице 5.3.3.

Дополнительно проводился синтез и изготовление ахроматических просветляющих покрытий для диапазонов спектра 3-5 мкм и 7-12 мкм на основе пленок SiO, Ge и ZnSe, которые имеют нулевую группу прочности, на предприятии ОАО НИИ «Гириконд».

На рис. 5.3.6 представлены спектры синтезированного покрытия и реализованного для диапазона 3-5 мкм на основе пленок SiO и Ge.

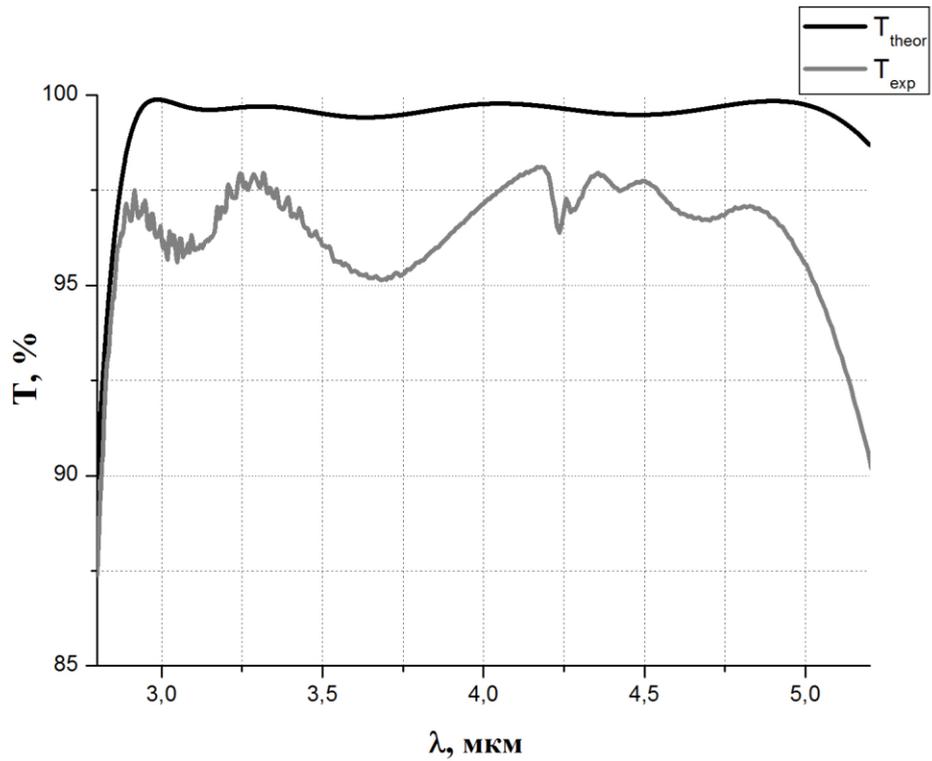
На рис. 5.3.7 представлены спектры синтезированного покрытия и реализованного для диапазона 7-12 мкм на основе пленок ZnSe, SiO и Ge.



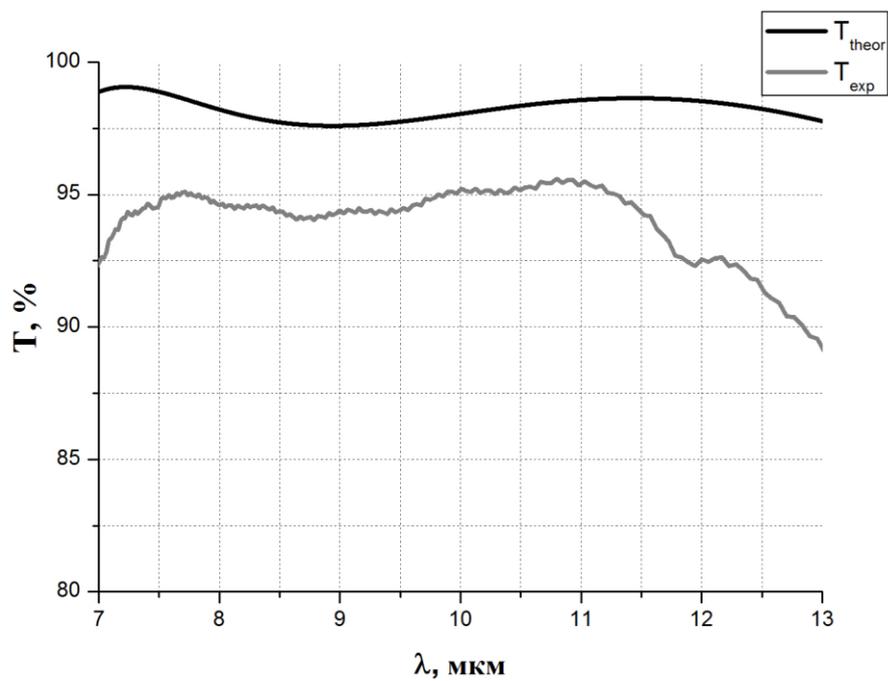
**Рис. 5.3.5.** Спектр реализованного покрытия на основе пленок Ge, ZnS, Y<sub>0.67</sub>Ba<sub>0.33</sub>F<sub>2.67</sub> на подложке Ge

**Таблица 5.3.3.** Синтезированные покрытия для диапазонов 3-5 мкм и 7-12 мкм, толщины указаны в долях  $\lambda_0/4$ , где  $\lambda_0 = 4\text{ мкм}$  (опорная длина волны при расчете на нашей программе).

№ слоя	Оптимизированное эквивалентное покрытие для диапазона <b>3-5 мкм</b>		Оптимизированное эквивалентное покрытие для диапазона <b>7-12 мкм</b>	
	материал	$d, \lambda/4$	материал	$d, \lambda/4$
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
1	SiO	20	ZnSe	0.92
2	Ge	0.43	Ge	0.69
3	SiO	0.69	SiO	2.56
4	Ge	0.26	-	-
5	SiO	0.51	-	-
6	Ge	2	-	-
7	SiO	0.94	-	-



**Рис. 5.3.6.** Спектры реализованного и синтезируемого покрытия на основе пленок SiO и Ge на подложке Ge в диапазоне 3-5 мкм



**Рис. 5.3.7.** Спектры реализованного и синтезируемого покрытия на основе пленок ZnSe, Ge и SiO на подложке Ge в диапазоне 7-12 мкм

Спектры реализованного и синтезируемого покрытия, представленные на рис. 5.3.6 и 5.3.7 с точностью до 5% они совпадают со спектрами синтезированных покрытий. Небольшие отличия обусловлены ошибками в толщинах слоев при изготовлении покрытия.

Полученное покрытие является широкополосным просветляющим покрытием с пропусканием от двух сторон более 95%. Оно обладает высокой механической прочностью и твердостью (первая группа), химической стойкостью, негигроскопичностью.

#### **5.4. Просветляющие покрытия на селениде цинка**

Селенид цинка (ZnSe) используется в качестве материала для производства оптических элементов: окон, линз, зеркал, призм, светоделителей и др. Его отличительной чертой является низкое поглощение в инфракрасной области. Материал, хотя и поликристаллический, но характеризуется однородной структурой, высоким пропусканием в ИК области и низкими внутренними потерями, связанными с поглощением и рассеянием. Селенид цинка наиболее часто применяется для изготовления компонентов для CO<sub>2</sub>-лазеров (включая высокомошные) и широкополосных спектральных приборов, работающих в диапазоне от 0.6 до 17 мкм. Обладает высоким показателем преломления ( $n=2.4$ ). Область прозрачности от 0.5 до 22 мкм.

В таблице 5.4.1 предложена структура просветляющего покрытия для 7-ми слоев на первых этапах конструирования, а также рассчитаны функция качества и критерий устойчивости.

В таблице 5.4.2. показан поэтапный процесс замены предложенной структуры эквивалентными слоями, типа НЛН.

В таблице 5.4.3 приведена окончательная конструкции ПП на основе пленок Ge, ZnS, Y<sub>0.67</sub>Ba<sub>0.33</sub>F<sub>2.67</sub>. Опорная длина волны 2.2 мкм.

**Таблица 5.4.1.** Структура ПП на подложке из ZnSe на первых этапах синтеза

Кол-во слоев	№ слоя	Начальное приближение		Оптимизированное нач. приближение		Функция качества	Критерий устойчивости
		$n$	$d, \lambda/4$	$n$	$d, \lambda/4$		
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
7-ми слойная структура	1	3.6	1	2.471	4.550	1.395	136.534
	2	3.2	1	2.309	1.273		
	3	2.8	1	2.094	1.124		
	4	2.4	1	1.888	0.813		
	5	2	1	1.683	1.037		
	6	1.6	1	1.499	0.747		
	7	1.35	1	1.350	1.801		

**Таблица 5.4.2.** Эквивалентные конструкции с различным числом слоев

Кол-во слоев	№ слоя	Оптимизир. нач. приближение		Эквивалентные структуры			
		$n$	$d, \lambda/4$	материал	$d, \lambda/4$	материал	$d, \lambda/4$
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
7-ми слойная структура	1	2.471	4.550	Ge ZnS Ge	6.465 27.273 6.465	Ge ZnS	6.465 27.273
	2	2.309	1.273	Ge ZnS Ge	0.886 9.135 0.886	Ge ZnS	7.351 9.135
	3	2.094	1.124	ZnS	9.876	Ge ZnS	0.886 12.482
	4	1.888	0.813	ZnS Y <sub>0.67</sub> Ba <sub>0.33</sub> F <sub>2.67</sub> ZnS	2.606 1.926 2.606	Y <sub>0.67</sub> Ba <sub>0.33</sub> F <sub>2.67</sub> ZnS	1.926 4.463
	5	1.683	1.037	ZnS Y <sub>0.67</sub> Ba <sub>0.33</sub> F <sub>2.67</sub> ZnS	1.857 5.409 1.857	Y <sub>0.67</sub> Ba <sub>0.33</sub> F <sub>2.67</sub> ZnS	5.409 1.998
	6	1.499	0.747	ZnS Y <sub>0.67</sub> Ba <sub>0.33</sub> F <sub>2.67</sub> ZnS	0.141 6.308 0.141	Y <sub>0.67</sub> Ba <sub>0.33</sub> F <sub>2.67</sub> ZnS	6.308 0.141
	7	1.350	1.801	Y <sub>0.67</sub> Ba <sub>0.33</sub> F <sub>2.67</sub>	17.436	Y <sub>0.67</sub> Ba <sub>0.33</sub> F <sub>2.67</sub>	17.436

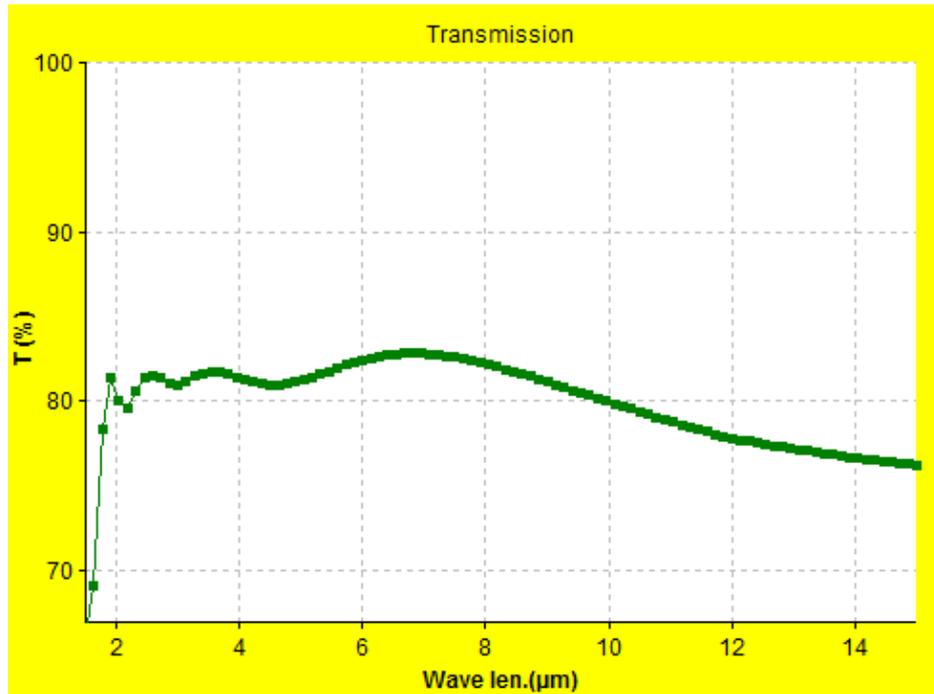
**Таблица 5.4.3.** Конструкции ПП на основе пленок Ge, ZnS,  $Y_{0.67}Ba_{0.33}F_{2.67}$ 

Покрытие	№ слоя	Оптимизированное эквивалентное покрытие		Функция качества	Критерий устойчивости
		материал	$d, \lambda/4$	$F$	$\sum_k (\Delta F_k / \Delta d_k)$
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
13-ти слойное покрытие	1	Ge	0.104	1.704	811.157
	2	ZnS	0.543		
	3	Ge	0.111		
	4	ZnS	0.626		
	5	Ge	0.129		
	6	ZnS	1.810		
	7	$Y_{0.67}Ba_{0.33}F_{2.67}$	0.114		
	8	ZnS	0.153		
	9	$Y_{0.67}Ba_{0.33}F_{2.67}$	0.171		
	10	ZnS	0.445		
	11	$Y_{0.67}Ba_{0.33}F_{2.67}$	0.490		
	12	ZnS	0.245		
	13	$Y_{0.67}Ba_{0.33}F_{2.67}$	1.063		

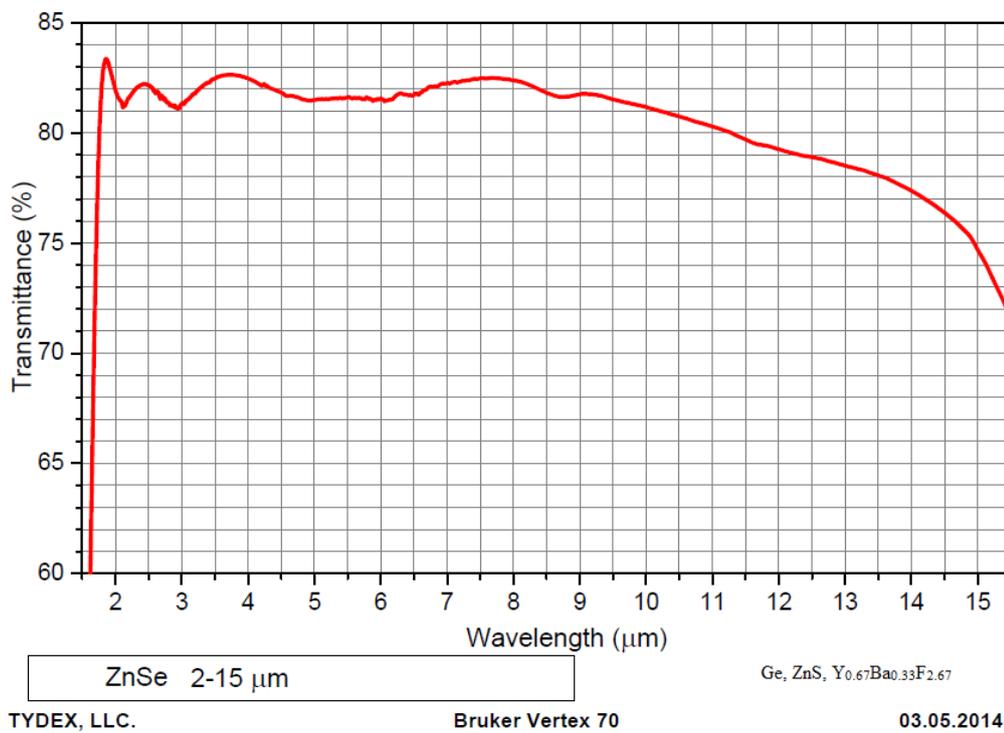
Нашей задачей было проектирование просветляющих покрытий на подложке из ZnSe с внедрением полученной смеси  $Y_{0.67}Ba_{0.33}F_{2.67}$ . Реализовывались широкополосные (ахроматичные) покрытия в области прозрачности ZnSe. Рассмотрим задачу нахождения ахроматических ПП от 2 до 12 мкм. Процедура синтеза такая же, как описанная в разделах 5.2, 5.3.

На рис. 5.4.1 представлен спектр синтезированного покрытия в диапазоне 2-12 мкм на основе пленок Ge, ZnS,  $Y_{0.67}Ba_{0.33}F_{2.67}$  на подложке ZnSe.

На рис. 5.4.2 спектр реализованного одностороннего покрытия на основе пленок Ge, ZnS,  $Y_{0.67}Ba_{0.33}F_{2.67}$  на подложке ZnSe на предприятии ООО «Тидекс». Расчет спектра делался для полубесконечной подложки  $T_{\max} = 83\%$ . С точностью до 2% они совпадают со спектрами синтезированных покрытий. Небольшие отличия обусловлены ошибками в толщинах пленок при изготовлении.



**Рис. 5.4.1.** Спектр синтезированного покрытия на основе пленок Ge, ZnS,  $Y_{0.67}Ba_{0.33}F_{2.67}$  на подложке ZnSe



**Рис. 5.4.2.** Спектр реализованного покрытия на основе пленок Ge, ZnS,  $Y_{0.67}Ba_{0.33}F_{2.67}$  на подложке ZnSe.

Полученное покрытие является широкополосным просветляющим покрытием в диапазоне 2-12 мкм со средним пропусканием более 81%. Оно обладает высокой механической прочностью и твердостью (первая группа), химической стойкостью, негигроскопично.

## Заключение

Во второй части диссертации приведены результаты синтеза ахроматических просветляющих покрытий. В третьей главе сделан обзор методов синтеза ИП, который позволил сделать вывод, что наиболее гибкими и универсальными являются численные методы. Эти методы основаны на решении задачи минимизации функции качества. Из всех методов синтеза мы выделили методику, основанную на теории эквивалентных слоев и численных методов оптимизации. В нашей работе эти методики развиты для синтеза ахроматических просветляющих покрытий.

В четвертой главе проведен обзор методов анализа устойчивости синтезированных покрытий. Предложена методика, в основе которой лежит введенный критерий устойчивости на основе исследования трансформации спектров при конечных ошибках в толщинах слоев. Для реализации этой методики создано программное обеспечение на языке Wolfram Mathematica-8.0. Проведен сравнительный анализ методик определения устойчивости спектральных характеристик для полосовых интерференционных фильтров, ахроматических просветляющих и светоделительных покрытий.

Анализ показал, что устойчивость, определенная по первой производной функции качества практически нигде не соответствует реальной. Устойчивость, определенная по второй производной позволяет выявить в структуре покрытия слои, наиболее критичные к изменению оптической толщины, но при этом количественные расхождения оптических толщин в слоях существуют. Показано, что для полосовых интерференционных фильтров оптимальными являются критерии устойчивости, предложенные нами и в работе [113].

Для просветляющих ахроматических покрытий введенный нами критерий дает хорошие результаты для любых видов ошибок. Устойчивость по критерию [113] для малой ошибки дает хорошие результаты, но с увеличением ошибок

начинаются расхождения с расчетными сдвигами. Для светоделительных покрытий введенный нами критерий устойчивости дает наилучшие результаты.

Таким образом, предложенная методика анализа устойчивости предоставляет возможность уже на первом этапе синтеза покрытия выявить в структуре слои, которые наиболее критичны к изменению оптической толщины, и прогнозировать их коррекцию в последующих слоях.

В пятой главе предложена методика синтеза просветляющих покрытий, которая базируется на использовании базовых структур из пленок с произвольными значениями показателей преломления и последующей заменой части пленок эквивалентными слоями, анализом устойчивости синтезированных структур. Описана модернизированная программа Film Manager, которая позволяет проводить замену начальной конструкции эквивалентной структурой, типа HLH или LHL. Из анализа полученных результатов видно, что спектральные характеристики базовых структур почти совпадают со структурами, в которых несуществующие в природе показатели преломления заменялись эквивалентными слоями из реально существующих материалов.

С помощью программы Film Manager синтезированы ахроматические просветляющие покрытия на подложках Si, Ge, ZnSe в диапазоне 2-12 мкм с внедрением исследуемых смесей:  $\text{BaF}_{0.98}\text{Mg}_{0.02}\text{F}_2$  и  $\text{Y}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{F}_{2.67}$ . Практически все синтезируемые покрытия были реализованы на практике на предприятиях ОАО НИИ «Гириконд», ООО «Тидекс». Все реализованные покрытия отличаются высокой механической прочностью и химической стойкостью. Это демонстрирует эффективность исследуемых смесей.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана методика исследования оптических констант пленок (показателей преломления и поглощения), базирующаяся на коррекции поглощения в спектрах пропускания и отражения, позволяющая решить задачу нахождения оптических констант при наличии сильных полос поглощения.
2. Составлена программа, поддерживающая методику нахождения оптических констант численными методами на языке Wolfram Mathematica - 8.0.
3. Проведены исследования оптических констант (ОК) пленок фторидов, которые наиболее перспективны в средней ИК области спектра. Определены ОК пленок  $\text{YF}_3$ ,  $\text{BaF}_2$ ,  $\text{CaF}_2$  в диапазоне спектра 2-12 мкм.
4. Проведены исследования оптических констант (ОК) пленок двойных фторидов (бифторидов), которые наиболее перспективны в средней ИК области спектра  $\text{BaF}_2\text{-MgF}_2$ ,  $\text{BaF}_2\text{-CaF}_2$ ,  $\text{YF}_3\text{-BaF}_2$ .
5. Впервые наблюдалось наличие дополнительной дисперсии пленок в областях дополнительного поглощения (3 мкм и 6 мкм), отсутствующих в монокристаллах.
6. Приведена база данных по оптическим константам тонких пленок  $\text{YF}_3$ ,  $\text{BaF}_2$ ,  $\text{CaF}_2$ , 98% $\text{BaF}_2$ +2% $\text{MgF}_2$ , 90% $\text{BaF}_2$ +10% $\text{CaF}_2$ , 67% $\text{YF}_3$ +33% $\text{BaF}_2$ , 50% $\text{YF}_3$ +50%  $\text{BaF}_2$  и 67%  $\text{YF}_3$  + 33%  $\text{CaF}_2$ . В базе использованы, как имеющиеся литературные данные, так и оригинальные результаты исследования в области спектра 2-12 мкм.
7. Разработана методика анализа устойчивости синтезированных покрытий, в основе которой лежит введенный критерий на основе трансформации спектров при конечных ошибках в толщинах слоев.
8. Для анализа критериев устойчивости была создана программа, написанная на языке Wolfram Mathematica - 8.0.

9. Проведен сравнительный анализ методик определения устойчивости спектральных характеристик для полосовых интерференционных фильтров, ахроматических просветляющих и светоделительных покрытий.
10. Предложена методика синтеза просветляющих покрытий, которая базируется на использовании базовых структур из пленок с произвольными значениями показателей преломления и последующей заменой части пленок эквивалентными слоями с помощью модернизированной программы Film Manager и предложенным анализом устойчивости синтезированных структур.
11. Результаты работы синтеза просветляющих покрытий на подложках из Si, ZnSe, Ge в среднем инфракрасном диапазоне спектра использованы при выполнении ряда опытно-конструкторских работ, проводимых на предприятиях ОАО НИИ «Гириконд», ООО «Тидекс».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Котликов Е.Н., Кузнецов Ю.А., Лавровская Н.П., Тропин А.Н.* Оптические пленкообразующие материалы для инфракрасной области спектра // Научное приборостроение. М.: – 2008 г. – Т. 18. – № 3. – С. 32-37.
2. *Мешков Б.Б., Яковлев П.П.* Проектирование интерференционных покрытий. М.: Машиностроение. –1987 г. – 185 с.
3. *Lehmann W., Heerdegen W., Schirmer G., Mutschke H., Richter W., Hacker E., Dohle R.* Structure correlated infrared properties of fluoride films. // Phys. stat. sol. –1990. –V.119. – pp.683-688.
4. *Котликов Е.Н., Варфоломеев Г.А., Лавровская Н.П., Тропин А.Н.* Проектирование, изготовление и исследование интерференционных покрытий. Учебное пособие. СПб.: ГУАП. –2010 г. –185 с.
5. *Котликов Е.Н., Терещенко Г.В.* Исследование оптических констант пленок, используемых для синтеза широкополосных просветляющих покрытий // Оптика и спектроскопия –1997 г. – Т.82. –№4. – С. 653-659.
6. *Котликов Е.Н., Хонинева Е.В., Прокашев В.Н.* Проблема снижения оптических потерь в пленках фторидов // Оптический журнал. – 2004 г. – Т.71. – №6. – С. 84 – 87.
7. *Котликов Е.Н., Иванов В.А., Новикова Ю.А., Тропин А.Н., Царев Ю.Н.* Исследование оптических свойств пленок легированных фторидов / Научный журнал. Известия ГУАП №1. СПб.: ГУАП. – 2011г. – С. 117-122.
8. *Крылова Т.Н.* Интерференционные покрытия. Л.: Машиностроение. – 1973 г. – 224 с.
9. *Dobrowolski J.A., Ho F.C., Waldorf A.* Determination of optical constants of thin film coating materials based on inverse synthesis // Applied Optics. – 1983. –Vol. 22, Issue 20. – pp. 3191-3200.
10. *Willey R.R.* Practical Production of Optical Thin Films // Willey Optical, Consultants: Charlevoix, MI, USA. – 2008. – 419 p.

11. *Tikhonravov A.V., Amotchkina T.V., Trubetskov M.K.* Optical characterization and reverse engineering based on multiangle spectroscopy // *Applied Optics*. – 2012. – Vol. 51. – № 2. – pp. 245-254.
12. *Gao L., Lemarchand F., Lequime M.* Exploitation of multiple incidences spectrometric measurements for thin film reverse engineering // *Optics Express*. – 2012. – Vol. 20. – № 14. – pp. 15734 – 15750.
13. *Кикоин И.К.* Таблицы физических величин. Справочник. М.: Атомиздат. – 1976 г. – С. 637-639.
14. *Аскоченский А.А.* Оптические материалы для инфракрасной техники. М.: Наука. – 1995 г. – С. 87-96.
15. *Гусин М.А., Мустаев Р.М.* Оптические свойства пленок фторида иттрия в ИК области спектра // *Оптический журнал*. – 1996 г. – №11. – С. 37-39.
16. *Bezuidenhout D., Clarke R., Pretorius R.* The Optical Properties of YF<sub>3</sub> films // *Thin Solid Films*. – 1987. – Vol. 155. – №1. – pp. 17-30.
17. Справочник технолога – оптика. Справочник под общ. ред. С. М. Кузнецова и М. А. Окатова. Л.: Машиностроение. – 1983 г. – 414 с.
18. *Коновалов О.П., Шаганов И.И.* Определение оптических констант слабопоглощающих диэлектрических слоев на прозрачной подложке // *ОМП*. – 1988 г. – №8. – С. 39-41.
19. *Толмачев В.А., Окатов М.А., Леонова Т.В.* Эллипсометрия: теория, методы, приложения. Новосибирск: Наука. – 1991 г. – 252с.
20. *Аззам Р., Бамара Н.* Эллипсометрия и поляризованный свет. М.: Мир. – 1981 г. – 582 с.
21. *Ржанов А.В.* Эллипсометрия – метод исследования поверхности. Сборник статей. Новосибирск: Наука. – 1983 г. – 180 с.
22. *Хевенс О.С.* Измерение оптических констант тонких пленок // *Сб. физика тонких пленок*. В 8 т. Т. 2. / Под общ. ред. Г. Хасса и Р. Э. Тауна; перевод с англ. под ред. В. Б. Сандомирского и А. Г. Ждана. М.: Мир. – 1967 г. – С. 136–185.

23. *Валяев А.С.* Определение оптических постоянных тонких слабопоглощающих слоев // Оптика и спектроскопия. – 1963 г. – Т.15. – В.4. – С. 500-511.
24. *Валяев А.С.* К методике определения оптических постоянных тонких слабопоглощающих слоев // Оптика и спектроскопия. – 1965 г. – Т.18. – В.5. – С. 889-891.
25. *Раков А.В.* Спектрофотометрия тонкопленочных полупроводниковых структур. М.: Сов. радио. – 1975 г. – 176 с.
26. *Swanepoel R.* Determination of the thickness and optical constants of amorphous silicon // J. Phys. E.: Sci. Instrum . – 1983. – Vol. 16. – pp. 1114-1122.
27. *Минков И.М., Ветлицкая Е.Л., Золотарев В.М., Капитонова Л.Н.* Определение оптических констант поглощающего неоднородного слоя по спектрам отражения // Оптика и спектроскопия. – 1985 г. – Т.58. – №3. – С.689-693.
28. *Житарюк В.Г., Гуминецкий С.Г.* О точности интерференционных методов определения оптических постоянных тонких слоев // Оптика и спектроскопия. – 1982 г. – Т.52. – №1. – С.126-130.
29. *Андриевский Б.В., Вахулович В.Ф., Курляк В.Ю., Романюк Н.А.* Определение дисперсии показателя преломления и толщины тонких пленок по спектрам отражения или пропускания // Оптика и спектроскопия. – 1988 г. – Т.65. – №1. – С.136-140.
30. *Филиппов В.В.* Аналитический метод определения оптических постоянных и толщины поглощающих пленок по спектрам отражения // Оптика и спектроскопия. – 1995 г. – Т.78. – №5. – С.798-801.
31. *Котликов Е.Н.* Исследование поглощения в зеркалах и пленках из селенида цинка и фторидов // Оптика и спектроскопия. – 1991 г. – Т.70. – №4. – С.838-841.

32. *Котликов Е.Н., Громов Д.Н., Иванов В.А., Коваленко И.И. и др.* О проблеме уменьшения поглощения света пленками в инфракрасной области спектра // *Высокоочищенные вещества.* – 1992 г. – №2. – С. 34-40.
33. *Bubbenzer A., Koidl P.* Exact expressions for calculating thin-film absorption coefficients from laser calorimetric data // *Applied Optics.* – 1984. –Vol.23. – №17. – pp.2886-2891.
34. *Гончаренко А.М., Редько В.П.* Введение в интегральную оптику. Минск: Наука и техника. – 1975. – 148 с.
35. *Андрушко Л.М.* Диэлектрические неоднородные волноводы оптического диапазона. Киев: Техника. – 1983 г. –144 с.
36. *Новикова Ю.А., Тропин А.Н., Шалин В.Б.* Эволюционное развитие методов определения параметров тонких пленок по результатам спектрофотометрических измерений // *Научная сессия ГУАП: Сб. докл.* СПб: ГУАП. – 2014 г. – С. 157-159.
37. *Котликов Е.Н., Иванов В.А., Крупенников В.А., Таллерчик Б.А., Тропин А.Н.* Исследование оптических констант пленок халькогенидов мышьяка в области длин волн 0.5 – 2.5 мкм // *Оптика и спектроскопия.* – 2007 г. – Т. 103. – № 6. – С. 983–987.
38. *Васильев Ф.П.* Численные методы решения экстремальных задач. М.: Наука. – 1980 г. – 520 с.
39. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. Пер. с англ. под ред. Г.П. Мотулевич М.: Наука. –1970 г. – 856 с.
40. *Власов А.Г.* Отражение и пропускание света системой тонких пленок // *ОМП.* – 1946 г. – №2. – С. 11-16.
41. *Котликов Е.Н., Терещенко Г.В.* Использование халькогенидных соединений для изготовления просветляющих покрытий в средней ИК области спектра // *Оптический журнал.* – 1997 г. – Т. 64. – № 3. – С. 110–115.
42. *Kotlikov E.N., Ivanov V.A., Tropin A.N.* Film's forming materials for THz Spectral Range Purposes // *USA.* – 5-8 July 2010. – Draft abstracts. – P. 88.

43. *Бернинг П. Х.* Теория и методы расчета оптических свойств тонких // Сб. физика тонких пленок. В 8 т. Т. 1. / Под общ. ред. Г. Хасса и Р. Э. Тауна; перевод с англ. под ред. В. Б. Сандомирского и А. Г. Ждана. М.: Мир. –1967 г. – С. 91–151.
44. *Кард П.Г.* Анализ и синтез многослойных интерференционных пленок. Таллин: Валгус. – 1971 г. – 235 с.
45. *Телен А.* Конструирование многослойных интерференционных светофильтров // Сб. физика тонких пленок. В 8 т. Т. 5. / Под общ. ред. Г. Хасса и Р. Э. Тауна; перевод с англ. под ред. В. Б. Сандомирского и А. Г. Ждана. М.: Мир. – 1972 г. – С. 46–83.
46. *Золотарев В.М., Морозов В.Н., Смирнова Е.В.* Оптические постоянные природных и технических сред. Справочник. Л.:Химия. – 1984 г. – 216 с.
47. *Минков И.М.* Просветление границы между изотропными средами для двух длин волн // Опт. мех. промышленность. – 1983 г. – №7. – С.1-3.
48. *Тун Р.Э.* Структура тонких пленок // Сб. физика тонких пленок. В 8 т. Т. 1. / Под общ. ред. Г. Хасса и Р. Э. Тауна; перевод с англ. под ред. В. Б. Сандомирского и А. Г. Ждана. М.: Мир. – 1967 г. – С. 231-275.
49. *Abeles F.* The propagation of electromagnetic waves in stratified media //Ann. Phys. – 1948. – Vol.3. – N.4. – pp.504-520.
50. *F. Van de Wielle.* Antireflected films and multilayers structures, in book: “Solid State Imaging” ed. by P. Jespers, Noordhoff-Leyden. – 1976. – pp.28-30.
51. *Котликов Е.Н., Терещенко Г.В.* Исследование оптических констант пленок, используемых для синтеза широкополосных просветляющих покрытий // Оптика и спектроскопия. – 1997 г. – Т.82. – №4. – С. 653-659.
52. *Котликов Е.Н., Новикова Ю.А.* Исследование пленкообразующих материалов на основе бинарных фторидов // II Всероссийская конференция по фотонике и информационной оптике. Сб. научных трудов. М.: НИЯ МИФИ. – 2013 г. – С.111-113.

53. *Котликов Е.Н., Новикова Ю.А.* Исследование оптических констант пленкообразующих материалов на основе фторидов для средней инфракрасной области // Сборник трудов VII Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2013». СПб.: ИТМО. – 2013 г. – С.275-277.
54. *Котликов Е.Н., Новикова Ю.А.* Исследование оптических констант пленок  $Ba_xMe_{1-x}F_2$  // Оптика и спектроскопия. – 2014 г. – Т. 117. – №3. – С.48-52.
55. *Котликов Е.Н., Андреев В.М., Новикова Ю.А.* Определение оптических констант пленок на подложках из кремния // Научная сессия ГУАП: Сб. докл. СПб: ГУАП. – 2013 г. – С. 167-170.
56. *Новикова Ю.А.* Исследование оптических констант пленок  $Y_xBa_{1-x}F_{2+x}$  // Сборник трудов VII Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2011». СПб.: ИТМО. – 2011 г. – Т.79. – С.316.
57. *Бугров Я.С., Никольский С.М.* Дифференциальное и интегральное исчисление // Высшая математика. В 3 т. Т. 2 / Под общ. ред. В. А. Садовниченко—6-е изд., стереотип. — М.: Дрофа. – 2004 г. – С. 186-200.
58. Wolfram Mathematica — 8.0. License Number: L3400-2803.Version: 8.0.4.  
<https://user.wolfram.com/portal/>
59. *Абильсиитов Г.А., Гонтарь В.Г., Колпаков А.А. и др.* Технологические лазеры // Справочник. В 2 т. Т.2 / М.: Машиностроение. – 1991 г. – С. 175-186.
60. *Котликов Е.Н., Гришечкина Г.Е., Коваленко И.И., Новикова Ю.А. и др.* Разработка и исследование оптических констант пленкообразующих материалов на основе бинарных фторидов для ИК области спектра. Отчет о НИР 1.55.11. № гос. регистрации 01201180708. // СПб.: ГУАП. – 2011 г. – 16 с.
61. *Котликов Е.Н., Лавровская Н.П., Новикова Ю.А. и др.* Исследование оптических констант халькогенидов и фторидов, полученных при ионном

- ассистировании. Отчет о НИР 53-00-708. № гос. регистрационный 01201152494 // СПб.: ГУАП. – 2012 г. – 26 с.
62. *Котликов Е.Н., Гришечкина Г.Е., Кузнецов Ю.А., Новикова Ю.А. и др.* Исследование оптических констант пленкообразующих материалов. Отчет о НИР 157-2. № гос. регистрации 01201054054 // СПб.: ГУАП. – 2011 г. – 22 с.
63. *Холлэнд Л.* Нанесение тонких пленок в вакууме. М.: Госэнергоиздат. – 1963 г. – 608 с.
64. *Майселла Л., Глэнга Р.* Справочник. Технология тонких пленок. // В 2 Т., Т.2 пер. с англ. под ред. М.И. Елинсона, Г.Г. Смолко. М.: Сов. радио. – 1977 г. – 768 с.
65. *Риттер Э.* Пленочные диэлектрические материалы для оптических применений // Сб. физика тонких пленок. Под общ. ред. Г. Хасса и Р. Э. Тауна; перевод с англ. под ред. В. Б. Сандомирского и А. Г. Ждана. В 8 Т., Т. 8. М.: Мир. – 1967 г. – С. 7 – 60.
66. Materion:[Электронныйресурс].URL  
<http://materion.com/ResourceCenter/ProductData/InorganicChemicals/Fluorides/BrochuresAndDataSheets/YttriumFluorideYF3.aspx> (Дата обращения 15.02.14)
67. *Фурман Ш.А.* Тонкослойные оптические покрытия. Л.: Машиностроение. – 1977 г. – 264 с.
68. *Минков И.М.* Простой способ определения показателей преломления слоев четвертьволновых просветляющих покрытий // Оптика и спектроскопия. – 1985 г. – Т.59. – В.1. – С. 212-659.
69. *Кокс Дж., Хаас Г.* Просветляющие покрытия для видимой и инфракрасной областей спектра // Сб. физика тонких пленок. В 8 т. Т. 2. / Под общ. ред. Г. Хасса и Р. Э. Тауна; перевод с англ. под ред. В. Б. Сандомирского и А. Г. Ждана. М.: Мир. – 1967. – С. 186–253.
70. *Мухамедов Р.К.* Определение оптимальных значений показателей преломления просветляющих покрытий //ОМП. – 1991г. – №2. – С. 57–60.

71. *Михайлов В.Н.* К теории синтеза интерференционных покрытий с помощью преобразования Фурье // *Оптика и спектроскопия.* – 1990 г. – Т. 69. – № 3. – С.698–703.
72. *Столлов Е.Г.* Синтез интерференционных оптических покрытий // *ОМП.* – 1982 г. – №5. – С. 10–11.
73. *Столлов Е.Г.* Синтез интерференционных оптических покрытий // *Оптика и спектроскопия.* – 1988 г. – Т.64. – В.1. – С. 147-150.
74. *Столлов Е.Г.* Банк данных для расчета и изготовления интерференционных покрытий // *ОМП.* – 1985г. – №7. – С. 43-45.
75. *Власов А.Г., Ермолаев А.М., Минков И.М.* Метод расчета многослойного покрытия с заданной отражательной способностью // *Оптика и спектроскопия.* – 1962 г. – Т.13. – № 2. – С. 259– 265.
76. *Минков И.М.* Об определении глобального минимума в задаче синтеза тонкослойных покрытий // *Оптика и спектроскопия.* – 1981г. – Т.50. – №.4. – С. 755-765.
77. *Евтушенко Ю.Г.* Методы поиска глобального экстремума // *Исследование операций.* М.: Изд-во АН СССР. – 1974 г. – В. 4. – С. 39–68.
78. *Свешников А.Г., Тихонравов А.В., Фурман Ш.А., Янин С.А.* Общий метод синтеза оптических покрытий // *Оптика и спектроскопия.* – 1985г. – Т. 59. – В. 5. – С. 1161–1163.
79. *Фурман Ш.А.* Синтез интерференционных покрытий // *Оптика и спектроскопия.* – 1984г. – Т.56. – В.2. – С.198-200.
80. *Baumeister P.W.* Design of multilayer filters by successive approximations. // *J. Opt. Soc. Amer.* – 1958. –Vol. 48. – pp. 955–958.
81. *Baumeister P.W.* Starting designs for the computer optimization of optical coatings // *Appl. Opt.* – 1995. –Vol. 34. – № 22. – pp. 4835–4843.
82. *Мухамедов Р.К., Майстер А.В., Гайнутдинов И.С.* Синтез покрытий пропускающего типа методом перебора // *ОМП.* –1990 г. – №12. – С. 61–63.

83. *Мухамедов Р.К., Хайрова Э.К., Азаматов М.Х., Касимов Р.И.* Метод расчета оптимальных значений показателей преломления просветляющих покрытий // ОМП. – 1992 г. – №1. – С.39-41.
84. *Губанова Л.А.* Оптические покрытия. Учебное пособие. СПб.: СПбГУ ИТМО. – 2012 г. – 101 с.
85. *Сосси Л.* Метод синтеза диэлектрических интерференционных покрытий // Изв. АН Эст. ССР. Сер. физ., матем. – 1974 г. – Т.23. – С.229-237.
86. *Сосси Л.* К теории синтеза многослойных диэлектрических светофильтров // Изв. АН Эст. ССР. Сер. физ., матем. – 1976 г. – Т.2. – С.176-177.
87. *Белл Р.Д.* Введение в фурье-спектроскопию. М.: Мир. – 1975 г. – 380 с.
88. *Rabinovich K., Pagis A.* Multilayer Antireflection Coatings: Theoretical Model and Design Parameters // Appl. Opt. – 1975. – V.14. – №6. – pp. 1326-1334.
89. *Knittl Z.* Optics of Thin Film Films. Wiley. London.1976. 324 p.
90. *Epstein L.I.* The design of optical filters. // J. Opt. Soc. Am. –1952. – V.42. – No 3. – pp.806-810.
91. *Thelen A.* Equivalent layers in multilayer filters // J. Opt. Soc. Am. 1966. V.56. No 6. P.1533-1538.
92. *Ohmer M.C.* Design of three-layer equivalent films // J. Opt. Soc. Am. – 1978. – V.68. – No 1. – pp.137-139.
93. *Macleod H.A.* Thin film optical filters. New York: McGraw-Hill. – 1986. – pp. 260-261.
94. *Тихонравов А.В.* Синтез слоистых сред. М.: Знание. – 1987 г. –48 с.
95. *Тихонравов А.В., Гришина Н.В.* Современные подходы к проектированию многослойных оптических покрытий // Компьютерная оптика. – 1992 г. – № 10-11. – С.3-48.
96. *Тихонравов А.В.* О задачах оптимального управления, связанных с синтезом слоистых сред // Дифференциальные уравнения. – 1985 г. – №21. – С. 1516-1523.

97. *Свешников А.Г., Тихонравов А.В., Янин С.А.* Синтез оптических покрытий при наклонном падении света // Журнал вычисл. матем. и матем. физики. – 1983 г. – № 23. – С. 929-939.
98. *Марков Ю.Н., Несмелов Е.А., Гайнутдинов И.С.* Метод синтеза ахроматических просветляющих и светоделительных покрытий // Оптика и спектроскопия. – 1979 г. – Т.46. – В.1. – С. 158-161.
99. *Несмелов Е.А., Конюхов Г.П.* К теории отрезающих интерференционных фильтров. // Оптика и спектроскопия. – 1971 г. – Т.31. – В. 1. – С. 133-137.
100. *Марков Ю.Н., Несмелов Е.А., Никитин А.С., Гайнутдинов И.С.* К теории полосовых интерференционных фильтров // Оптика и спектроскопия. – 1977 г. – Т. 43. – В. 5. – С. 984-989.
101. *Боглаев Ю.П.* Вычислительная математика и программирование. М.: Высшая школа. – 1990 г. – 544 с.
102. *Минков И.М., Веремей В.В.* К расчету тонкослойных покрытий с заданными оптическими свойствами // Оптика и спектроскопия. – 1974 г. – Т. 37. – В. 5. – С. 998-1000.
103. *Шатилов А.В., Тютикова Л.П.* Пример расчета интерференционного светофильтра методом последовательного синтеза // Оптика и спектроскопия. – 1963 г. – Т.14. – В.3. – С. 426-429.
104. *Dobrowolski J.A.* Comparison of the forier transform and flip-flop thin film synthesis methods. // Applied Optics. – 1986. – V.25. – №12. – pp. 1966-1972.
105. *Baumeister F.* Startinlg designs for the computer optimization of optical coatings // Applied Optics. – 1995. – № 34. –pp. 4835–4843.
106. *Котликов Е.Н., Шалин В.Б., Тропин А.Н.* Синтез оптических покрытий с применением генетических алгоритмов // СПб: Научно-технический вестник ИТМО. – 2011г. – №05/75. – С. 1-5.
107. *Котликов Е.Н., Шалин В.Б., Тропин А.Н.* Особенности функционирования алгоритмов многокритериальной оптимизации на основе эволюционных

- стратегий // Сборник трудов VII Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2013». СПб.: ИТМО. – 2013г. – С. 338-339.
108. *Котликов Е.Н., Новикова Ю.А.* Просветляющие покрытия для кремния в средней ИК на основе эквивалентных слоев // Научная сессия ГУАП: Сб. докл. СПб: ГУАП. – 2014 г. – С. 159-167.
109. *Амочкина Т.В.* Алгоритм синтеза многослойных оптических покрытий, основанный на теории эквивалентных слоев // Вычислительные методы и программирование. – 2005 г. – Т.6. – 71-85.
110. *Котликов Е.Н., Хонинева Е.В.* Программа синтеза интерференционных покрытий «FlmMgr» / СПб: ГУАП. 2011 г. № гос. Регистрации 2011612364.
111. *Котликов Е.Н., Варфоломеев Г.А., Тропин А.Н.* Анализ стабильности спектроделительных интерференционных покрытий // Научная сессия ГУАП: Сб. докл. Завалишенские чтения. СПб: ГУАП. – 2007 г. – С.137-140.
112. *Котликов Е.Н., Прокашев В.Н., Хонинев А.Н., Хонинева Е.В.* Синтез светоделительных покрытий // Оптический журнал. –2001 г. – Т. 68. – № 8. – С. 49–52.
113. *Балышев К.В., Путилин Э.С., Старовойтов С.Ф.* Исследование воспроизводимости выходных параметров многослойных диэлектрических систем во время изготовления // Оптический журнал. – 1998 г. – Т.65. – № 3. – С.39 – 43.
114. *Котликов Е.Н., Тропин А.Н.* Критерий устойчивости спектральных характеристик многослойных интерференционных покрытий // Оптический журнал. – 2009 г. – Т. 76. – № 3. – С. 60-64.
115. *Котликов Е. Н., Моцарь Е.В., Новикова Ю.А., Тропин А.Н.* Анализ устойчивости многослойных интерференционных покрытий / Научный журнал. Известия ГУАП №1. СПб.: ГУАП. – 2011 г. – С.123-131.
116. *Котликов Е.Н., Иванов В.А., Моцарь Е.В., Новикова Ю.А., Тропин А.Н.* Анализ устойчивости спектральных характеристик многослойных

- оптических покрытий // Оптика и спектроскопия. – 2011г. – Т.111. – №3. – С.515-520.
117. *Котликов Е.Н., Моцарь Е.В., Новикова Ю.А., Матросов С.В.* Синтез широкополосных просветляющих покрытий для ИК области спектра // Научная сессия ГУАП: Сб. докл. – 2011 г. – С. 130-133.
118. *Котликов Е.Н., Новикова Ю.А.* Сравнительный анализ критериев устойчивости интерференционных покрытий // Оптический журнал. – 2013 г. – Т.80. – №9. – С. 61-67.
119. *Котликов Е.Н., Новикова Ю.А., Щербак С.Я.* Анализ устойчивости и коррекции многослойных интерференционных покрытий по трансформации спектров пропускания // Научная сессия ГУАП: Сб. докл. – 2012 г. – С. 174-177.
120. *Котликов Е.Н., Новикова Ю.А. и др.* Модернизация программного обеспечения для синтеза интерференционных покрытий в средней ИК области спектра и разработка методик синтеза и анализа устойчивости интерференционных покрытий. Отчет о НИР 533-2д. № гос. регистрации 01201177036. // СПб.: ГУАП. –2012 г. – 40 с.
121. *Котликов Е.Н., Новикова Ю.А.* Программное обеспечение для анализа устойчивости и коррекции интерференционных покрытий // Научный журнал, информационно-управляющие системы: Политехника. – 2013г. – № 1(62). – С. 41- 46.
122. *Котликов Е.Н., Новикова Ю.А., Прилипко В.К.* Программное обеспечение для анализа устойчивости интерференционных покрытий // Научная сессия ГУАП: Сб. докл. – 2012 г. – С.171-173.
123. *Котликов Е.Н., Гришечкина Г.Е., Лавровская Н.П., Новикова Ю.А. и др.* Разработка программного обеспечения для анализа устойчивости интерференционных покрытий. Отчет о НИР 1.8.12. № гос. регистрации 01201258168. // СПб.: ГУАП. – 2012 г. – 21 с.

124. *Котликов Е.Н., Новикова Ю.А.* Сравнительный анализ критериев устойчивости интерференционных покрытий. Сборник трудов VII Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики – 2012»/ СПб.: ИТМО. – 2012 г. – С. 198-199.
125. *Котликов Е.Н., Кузнецов Ю.А., Гришечкина Г.Е., Новикова Ю.А. и др.* Разработка новых методов синтеза, анализа устойчивости и коррекции оптических интерференционных покрытий. Отчет о НИР С003. Гос. регистрации 01201252354. // СПб.: ГУАП. –2013 г. – 28 с.
126. *Новикова Ю.А.* Синтез, изготовление и исследование оптических интерференционных покрытий для средней ИК области спектра. Отчет о НИР ГрСП-1/12. № гос. регистрации 01201278143. // СПб.: ГУАП. – 2013 г. – 21 с.
127. *Котликов Е.Н., Иванов В.А., Новикова Ю.А., Тропин А.Н.* Проектирование и особенности изготовления инфракрасных оптических покрытий с воспроизводимыми характеристиками / Научный журнал. Известия ГУАП №1. СПб.: ГУАП. – 2011г. – С. 72-78.
128. *Новикова Ю.А.* Синтез ахроматических просветляющих покрытий для ИК области спектра. Сборник трудов VII Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2011». СПб.: ИТМО. – 2011г. – Т.79. – С.511.
129. *Котликов Е.Н., Новикова Ю.А., Прокашев В.Н., Тимофеевский А.В.* Исследование оптических пленок  $Y_xBa_{1-x}F_{2+x}$ . // Научная сессия ГУАП: Сб. докл. – 2011г. – С. 133-136.
130. *Котликов Е.Н., Лавровская Н.П., Новикова Ю.А., Тимофеевский А.В., Шалин В.Б.* Оптические константы пленок фторида иттрия. // Научная сессия ГУАП: Сб. докл. – 2010 г. – С.160-163.
131. *Котликов Е.Н., Новикова Ю.А.* Исследование оптических пленок фторидов и бифторидов. // Научная сессия ГУАП: Сб. докл. – 2013 г. – С.173 -176.

132. *Терещенко Г.В.* Синтез просветляющих покрытий для ИК области спектра на основе эквивалентных слоев. Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд-та физ.-мат. наук // Санкт-Петербург: СПбГААП. – 1997 г. – 18 с.