

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**

Л.А.Губанова

ОПТИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ

Учебное пособие

Санкт-Петербург

2012

Губанова Л.А., Оптические покрытия. Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2012. – 101с.

Пособие представляет собой руководство к выполнению лабораторных работ по курсу «Оптические покрытия» и содержит сведения о различных видах интерференционных покрытий, их структуре, способах изготовления и контроля спектральных характеристик. Большое внимание уделено влиянию структуры (количество слоёв, формирующих покрытие, параметры плёнообразующих материалов, из которых образованы слои, их чередование) на спектральные характеристики интерференционных покрытий.

Пособие может быть полезно при изучении курсов «Оптические покрытия», «Оптические материалы и технология их обработки».

Пособие предназначено для студентов оптических и оптико-электронных специальностей приборостроительных вузов.

Рекомендовано УМО по образованию в области приборостроения и оптоэлектроники в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки бакалавров и магистров 200200 «Оптоэлектроника» и дипломированных специалистов по специальностям 200201 «Лазерная техника и лазерные технологии», 200203 «Оптико-электронные приборы и системы», 200204 «Оптические технологии и материалы», материалы рукописи оптические покрытия автора Путилина Э.С. решением № 353 заседания Президиума Совета УМО от «25» марта 2009г.

В 2007 году СПбГУ ИТМО стал победителем конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007–2008 годы. Реализация инновационной образовательной программы «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий» позволит выйти на качественно новый уровень подготовки выпускников и удовлетворить возрастающий спрос на специалистов в информационной, оптической и других высокотехнологичных отраслях экономики.



©Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, 2012

© Л.А.Губанова
2012

СОДЕРЖАНИЕ

	ВВЕДЕНИЕ	4
1	Лабораторная работа №1 Исследование свойств однослойных интерференционных диэлектрических покрытий.....	8
2.	Лабораторная работа №2 Исследование влияния условий осаждения металлических слоёв на характеристики нейтральных светофильтров.....	20
3.	Лабораторная работа №3 Определение условий изготовления просветляющих покрытий осаждением плёнкообразующих веществ испарением в вакууме....	36
4.	Лабораторная работа №4 Исследование металлодиэлектрических зеркал.....	49
5.	Лабораторная работа №5 Исследование влияния условий осаждения на характеристики спектроделителей.....	60
6.	Лабораторная работа №6 Изготовление и исследование характеристик узкополосных диэлектрических фильтров.....	78
7	Заключение	87
8	Приложение.....	90
	История кафедры.....	100

Введение

Внедрение оптических приборов и методов исследования в различные области науки и техники приводит к необходимости создания многослойных диэлектрических, металлодиэлектрических систем с уникальными требованиями к их свойствам. Это в первую очередь оптические, физико-механические, химические и другие свойства. Из оптических свойств следует упомянуть непрерывно расширяющийся спектральный диапазон работы приборов, ужесточение требований к лучевой стойкости и прочности покрытий, сочетание возможности отражения (пропускания) и формирования волнового фронта отражённого (прошедшего) излучения. В некоторых случаях требуется работа покрытий со сходящимися или расходящимися пучками, т.е. ужесточаются требования к их поляризационным свойствам. Поэтому разумно рассмотреть отдельные типы покрытий: просветляющие (антиотражающие), зеркальные, свето- и спектроразделительные, фильтрующие и поляризующие. Особой задачей является осаждение покрытий на нестойких стёклах, кристаллах и полимерах.

Плёнки, нанесённые на преломляющие и отражающие грани оптических элементов позволяют формировать требуемые, разнообразные, часто уникальные спектральные кривые, которые могут быть реализованы благодаря уникальному свойству тонкоплёночных систем. Этим уникальным свойством является интерференция света в плёнках, реализуемая практически для всех источников света, в виду малой длины когерентности источников излучения, необходимой для тонкослойных систем. Незначительная масса и относительная простота реализации (например, путём термического или электронно-лучевого испарения вещества в вакууме, осаждение покрытий из растворов или паров плёнкообразующих соединений и др.), позволяют широко применять интерференционные покрытия.

Просветляющие покрытия. Основная, почти классическая задача, просветляющих покрытий - увеличение спектрального диапазона и уменьшение остаточного отражения. Решение её при создании покрытий, работающих в широком спектральном диапазоне, включающем ультрафиолетовую, видимую и ближнюю инфракрасную часть спектра, осложняется тем, что оно существенно зависит от показателя преломления просветляемого материала. Показатель преломления просветляемых материалов лежит для ультрафиолетового диапазона излучения в интервале от 1,35 до 2,20; видимого диапазона от 1,35 до 2,40; инфракрасного диапазона от 1,35 до 9,0. Набор стабильных, химически устойчивых, стойких к воздействию внешней атмосферы плёнкообразующих материалов невелик. В качестве плёнкообразующих материалов в основном используются оксиды, фториды, сульфиды элементов 3-5 групп таблицы Д.И.Менделеева и некоторые более сложные

соединения. Наибольшие трудности возникают при создании антиотражающих покрытий на материалах с малым показателем преломления. Однако, при использовании современных методов синтеза удаётся создавать конструкции, обеспечивающие заданные требования. Такие конструкции содержат слои, толщина которых не превышает нескольких нанометров, что вызывает значительные технологические сложности при их реализации, связанные как с контролем толщины слоёв в процессе их изготовления, так и со стабильностью параметров плёнок во времени. Это требует создания новых методов контроля толщины в процессе осаждения и исследования изменения свойств этих слоёв в процессе эксплуатации. Не меньший интерес в последнее время предъясвляется к покрытиям, работающим в области вакуумного ультрафиолета. Создание таких покрытий в настоящее время сдерживается из-за отсутствия знаний о показателях преломления плёнкообразующих материалов, прозрачных в этой области спектра и приборов, позволяющих аттестовать эти материалы с достаточной точностью.

Особый интерес в последние годы проявляется к просветляющим покрытиям с переменным по толщине показателем преломления. Хотя свойства таких покрытий известно очень давно их экспериментальная реализация к настоящему времени почти отсутствует. В последнее время, в связи с экспериментальными исследованиями, посвящёнными одновременному испарению двух и более плёнкообразующих материалов в вакууме, появляется надежда на создание таких покрытий.

Свето- и спектроделительные покрытия. Светоделительные покрытия – это покрытия, которые делят падающий световой поток на отражённый и прошедший, величина которых может быть любой. Обычно задаётся отношение заданного и прошедшего потоков. Спектроделительное покрытие – это покрытие, которые делят падающий световой поток на отражённый и прошедший, но с разным спектральным составом. При этом, например, излучение, лежащее в коротковолновой, относительно некоторой длины волны, отражается (энергетический коэффициент отражения R), а длинноволновое излучение пропускается (энергетический коэффициент пропускания T). Для спектроделительных покрытий, особенно применяемых в оптоэлектронике и оптической связи, основная проблема заключается в уменьшении спектрального диапазона зоны, в которой коэффициент отражения или пропускания меняется быстро (крутизна спектральной характеристики, определяемая как $dT/d\lambda$ или $dR/d\lambda$ должна иметь максимальное значение в этом диапазоне). Зоны прозрачности, подавления и контрастность, определяемая как отношение максимального T_{\max} и минимального пропускания T_{\min} , должны иметь фиксированное значение, которое определяется техническим заданием. Основная сложность, возникающая при конструировании таких покрытий, заключается в обеспечении максимального значения производных $dT/d\lambda$ ($dR/d\lambda$). Классический путь её преодоления - использование систем,

состоящих из большого числа четвертьволновых слоёв с малой разницей в показателях преломления плёнообразующих материалов. Однако при этом зона максимального отражения уменьшается пропорционально разнице в показателях преломления. Аналогичный результат может быть достигнут при использовании материалов с большой разницей показателей преломления плёнообразующих материалов при меньшем числе слоёв, что не всегда возможно в ультрафиолетовой и видимой областях спектра из-за отсутствия таковых. При решении этой задачи необходимо искать компромиссный вариант, позволяющий при разумном количестве слоёв достичь заданной величины крутизны. Этот компромисс определяется свойствами плёнообразующих материалов (собственные напряжения и коэффициент термического расширения плёнок) и материала подложки.

Зеркальные покрытия. Создание систем с максимальным коэффициентом отражения как на кратных длинах, так и некратных целому числу длин волн и расширение спектрального диапазона, захватывающего спектральный диапазон от ультрафиолетовой до ближней ИК-области спектра, создание узкополосных зеркал-зеркал с минимальной шириной области максимального отражения является актуальными задачами, во многом противоречащими друг другу. Разработка конструкции таких зеркал в принципе может быть решена с помощью современных методов синтеза многослойных диэлектрических систем. Увеличение коэффициента отражения до величины, максимально приближенной к ста процентам, значительно увеличивает общую толщину диэлектрической системы. Это увеличение общей толщины приводит к тому, что система начинает разрушаться под действием механических напряжений, возникающих в слоях. Возможным выходом из этой ситуации является подбор пар слоёв взаимно компенсирующих как собственные, так и термические напряжения. При создании широкополосных систем перспективным является использование металлодиэлектрических систем. Подобный подход к конструированию широкополосных отражателей может быть использован для создания лазерных систем, если напряжённость электрического поля световой волны излучения, доходящего до металлического слоя уменьшается на один-два порядка. Особый интерес представляют системы, в состав которых входят слои с заданным распределением показателя преломления по толщине. Такие системы не только исключают границы раздела между слоями, изготовленными из различных материалов, что значительно увеличивает механическую прочность и лучевую стойкость покрытия, но и позволяют реализовать узкополосные системы, работающие как на кратных, так и на некратных длинах волн.

Поляризующие покрытия. В работе современных оптико-электронных приборов часто используется поляризованное излучение. Ориентация плоскости поляризации или соотношение между поляризациями, ориентированными в разных плоскостях (в плоскости падения или

перпендикулярно ей, зависит от назначения прибора . многослойные диэлектрические системы, в зависимости от конструкции и от угла падения излучения, позволяют управлять свойствами отражённого или прошедшего потоков излучения. Свойства покрытий (поляризующих покрытий) зависят существенным образом от угла падения излучения и расходимости падающего потока. Если для лазерных источников расходимость излучения мала, то для ряда других источников расходимость может достигать величины нескольких десятков градусов. Эти источники характеризуются не только большой расходимостью, но и достаточно широким спектральным диапазоном излучения. Это существенно ужесточает требования к конструкции многослойных систем, отражающих или пропускающих световой поток с произвольным, наперёд заданным состоянием поляризации, расходимости и спектральным диапазоном излучения. Возможность получения покрытий, обладающих воспроизводимыми спектральными характеристиками, при падении излучения с заданным состоянием поляризации и расходимостью определяется точностью контроля и стабильностью режимов осаждения.

Основная сложность, которая возникает при изготовлении перечисленных выше покрытий, заключается в непостоянстве показателей преломления плёнообразующих материалов слоёв, входящих в состав диэлектрических и металлодиэлектрических систем, а также в недостаточной точности контроля толщины слоёв в процессе осаждения.

Особый тип покрытий составляют покрытия с переменным по поверхности элемента коэффициентом отражения или пропускания (топологические покрытия). Одной из областей их использования является лазерная техника, в которой они могут применяться как элементы резонаторов лазеров, формирующих излучение с узкой диаграммой направленности. Другой возможной областью их применения является создание покрытий, меняющих форму поверхности отражающего или преломляющего оптического элемента. Это могут быть так называемые асферизирующие покрытия, характерной особенностью которых является постоянство коэффициента отражения при изменяющейся по поверхности оптического элемента толщиной одного или нескольких слоёв. Конструкция таких систем (показатели преломления, оптические толщины слоёв, распределение толщин по поверхности оптического элемента) определяется требованиями к форме волнового фронта отражённого или прошедшего излучения и величиной постоянства или максимального (минимального) изменения коэффициентов отражения по поверхности подложки. Основная сложность при изготовлении таких покрытий состоит в воспроизведении расчетного распределения толщин слоёв по поверхности элемента и их контроле в процессе осаждения, что требует проведения соответствующих исследований. Особый интерес здесь представляет исследование оптических параметров плёнок с большим

градиентом толщины, которая меняется от нуля до четверти длины волны, во времени.

Лабораторная работа № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ОДНОСЛОЙНЫХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Цель работы - исследование параметров, определяющих энергетические и спектральные характеристики однослойных диэлектрических покрытий при формировании их методом термического испарения в вакууме. Измерение спектральных характеристик изготовленных однослойных диэлектрических покрытий. Сравнение экспериментальных и расчетных спектральных зависимостей. Расчёт показателя преломления и оптической толщины изготовленных покрытий.

Теоретическая часть

Рассмотрим нормальное падение монохроматического излучения с длиной волны λ на бесконечно протяжённую границу раздела сред с

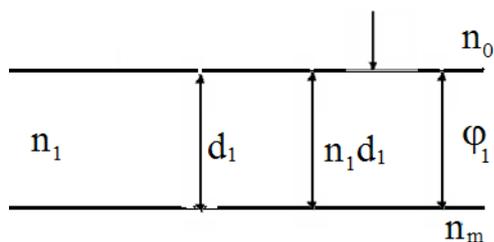


Рис. 1.1. Схема однослойного покрытия

показателями преломления $n_0 - n_m$. На этой границе расположен изотропный, однородный, бесконечно протяжённый плоскопараллельный идеально прозрачный слой с оптической толщиной $n_1 d_1$, и фазовой толщиной $\varphi_1 = 2\pi n_1 d_1 (\lambda)^{-1}$.

Амплитудный коэффициент отражения плоского волнового фронта для такого слоя в соответствии с [1] будет равен:

$$r = \frac{(n_0 m_{11} - n_m m_{22}) + i(n_0 n_m m_{12} - m_{21})}{(n_0 m_{11} + n_m m_{22}) + i(n_0 n_m m_{12} + m_{21})}, \quad (1.1)$$

где: $m_{11}, m_{12}, m_{21}, m_{22}$ элементы матрицы преобразования электромагнитного излучения, которая иногда в литературе называется матрицей интерференции. Для одного слоя эти элементы равны:

$$m_{11} = m_{22} = \cos \varphi_1, \quad m_{12} = \frac{1}{n_1} \sin \varphi_1, \quad m_{21} = n_1 \sin \varphi_1. \quad (1.2)$$

Амплитудный коэффициент отражения в общем случае комплексное число, т.е. $r = |r| e^{-i\varphi}$. Если «r» - число положительное, то разность фаз между падающим и отражённым излучением равна нулю, а если «r» -

отрицательное, то разность фаз равна π . При отражении от среды с большим показателем преломления, как это установлено экспериментально, свет теряет половину длины волны, т.е. разность фаз между падающей и отражённой волнами равна « $-\pi$ ». При отражении излучения от слоя разность фаз есть число, отличное от 0 и π , и она изменяется как функция длины волны, показателя преломления и толщины слоя. Энергетический коэффициент отражения такого слоя - это квадрат модуля амплитудного коэффициента отражения:

$$R = |r|^2. \quad (1.3)$$

Энергетический коэффициент отражения R , в этом случае описывается дробно-линейной функцией, которая очень не удобна для анализа:

$$R = \frac{(n_0 m_{11} - n_m m_{22})^2 + (n_0 n_m m_{12} - m_{21})^2}{(n_0 m_{11} + n_m m_{22})^2 + (n_0 n_m m_{12} + m_{21})^2}. \quad (1.4)$$

Для упрощения анализа зависимости характеристик однослойного не поглощающего покрытия, воспользовавшись соотношением $R+T+A=1$, где T , R и A – энергетические коэффициенты пропускания, отражения и поглощения, помня, что $A=0$ определим коэффициент пропускания такой системы:

$$T = \frac{4n_0 n_m}{(n_0 m_{11} + n_m m_{22})^2 + (n_0 n_m m_{12} + m_{21})^2}. \quad (1.5)$$

Для матриц преобразования, описывающих прозрачные слои, в которых отсутствует поглощение, диагональные элементы матрицы всегда действительные числа, а элементы, лежащие на побочной диагонали, мнимые числа.

Зависимость для энергетического коэффициента пропускания однослойной системы описывается дробно-линейной функцией, для анализа это очень не удобно и поэтому удобнее ввести функцию обратную пропусканию, т.е. функцию такого вида:

$$G_1 = (T)^{-1}. \quad (1.6)$$

Это функция G будет квазинелинейной функцией матричных элементов и её легче анализировать. А ещё лучше написать:

$$G = 4n_0 n_m G_1. \quad (1.7)$$

Постоянный множитель, который мы здесь вводим, практически не влияет на результаты анализа, и функция G_1 будет иметь следующий вид:

$$G_1 = (n_0 m_{11} + n_m m_{22})^2 + (n_0 n_m m_{12} + m_{21})^2. \quad (1.8)$$

Функция G_1 , после подстановки матричных элементов имеет следующий вид:

$$G_1 = (n_0 - n_m)^2 \cos^2 \varphi_1 + \left(\frac{n_0 n_m}{n_1} + n_1 \right)^2 \sin^2 \varphi_1. \quad (1.9)$$

Для анализа влияния фазовой толщины на пропускание однослойного покрытий перепишем выражение (1.9) в следующем виде:

$$2G_1 = (n_0 - n_m)^2 + \left(\frac{n_0 n_m}{n_1} + n_1 \right)^2 + \left[(n_0 - n_m)^2 - \left(\frac{n_0 n_m}{n_1} + n_1 \right)^2 \right] \cos 2\varphi_1 =$$

$$= A + B \cos 2\varphi_1,$$

где:

$$A = (n_0 - n_m)^2 + \left(\frac{n_0 n_m}{n_1} + n_1 \right)^2, \quad B = (n_0 - n_m)^2 - \left(\frac{n_0 n_m}{n_1} + n_1 \right)^2.$$

Рассматриваемая функция периодическая с периодом π и достаточно простая. Эта функция имеет экстремумы в случае, когда $\varphi_1 = 0.5 \cdot k\pi$. Вид экстремума будет определяться знаком при коэффициенте $\cos 2\varphi_1$. Функция G_1 , так же, как функции R и T будет иметь экстремумы при $\varphi_1 = 0, 0.5\pi, \pi, 1.5\pi, 2\pi$. При $\varphi_1 = 0$ это будет либо $A+B$, если B больше нуля, либо $A-B$, если B меньше нуля. Тогда, в зависимости от знака B , рассматриваемая функция будет иметь зависимости, изображённые на рис.

1.2. Для $B > 0$ функция G_1 имеет минимум при $\varphi_1 = \frac{\pi}{2}$. Поскольку функция G - величина обратная T , то пропускание будет вести себя обратным образом, т.е. T имеет максимальное значение (рис.1.3).

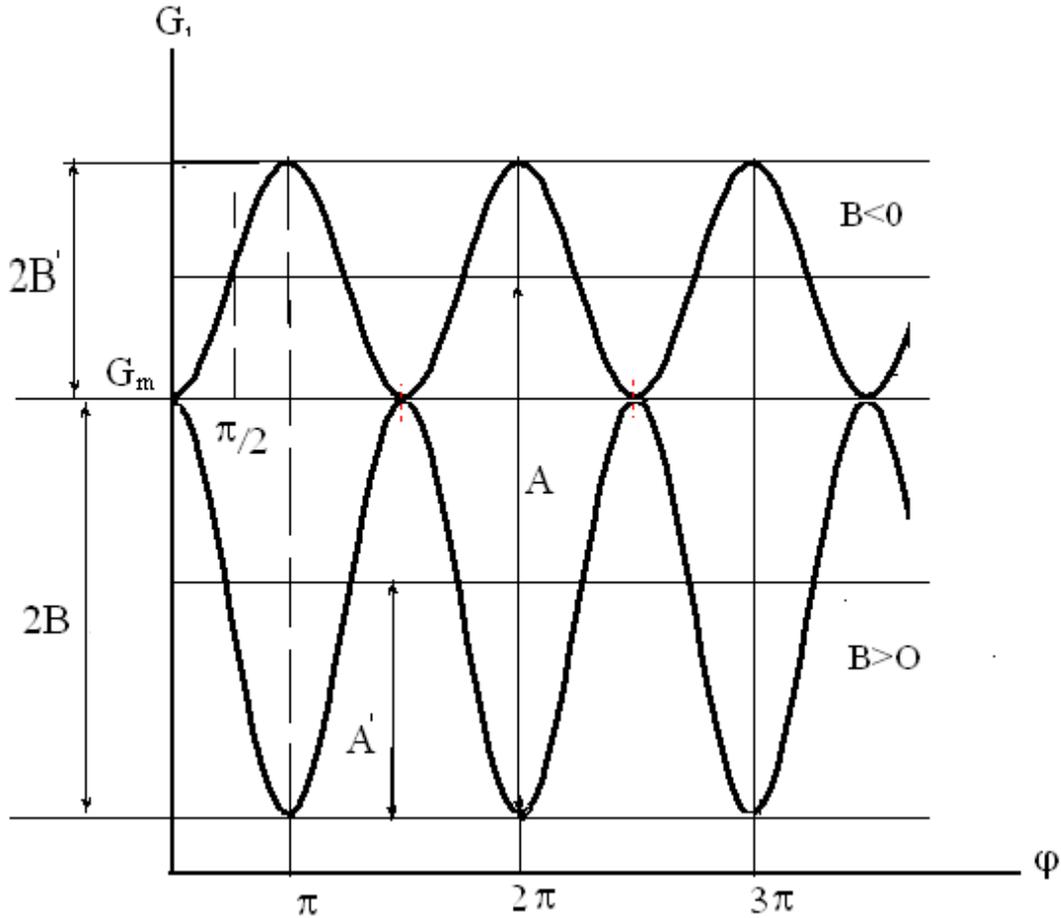


Рис.1.2. Зависимость функции G_1 от фазовой толщины слоя.

Таким образом, если $B > 0$, то при увеличении толщины слоя, пропускание начинает возрастать, а отражение уменьшаться. Эта факт достаточно интересен. По мере увеличения фазовой толщины слоя пропускание границы раздела может возрастать, в обратном случае, когда $B < 0$, пропускание будет падать, в первом случае система будет просветляющей, во втором - зеркальной. В первом случае коэффициент отражения на границе раздела уменьшается, во втором он увеличивается. Следовательно, один слой может работать как зеркальный и как слой, уменьшающий отражение. Это определяется знаком перед коэффициентом B . Этот коэффициент равен:

$$B = (n_0 - n_m)^2 - (n_0 n_m (n_1)^{-1} + n_1)^2. \quad (1.10)$$

Выражение (1.10) можно переписать в следующем виде:

$$B = n_0^2 + n_m^2 - (n_0 n_m n_1^{-1})^2 - n_1^2 = n_0^2 n_1^{-2} (n_1^2 - n_m^2) - (n_1^2 - n_m^2).$$

Получаем:

$$B = n_1^{-2} (n_1 - n_m)(n_0 - n_1)(n_1 + n_m)(n_0 + n_1). \quad (1.11)$$

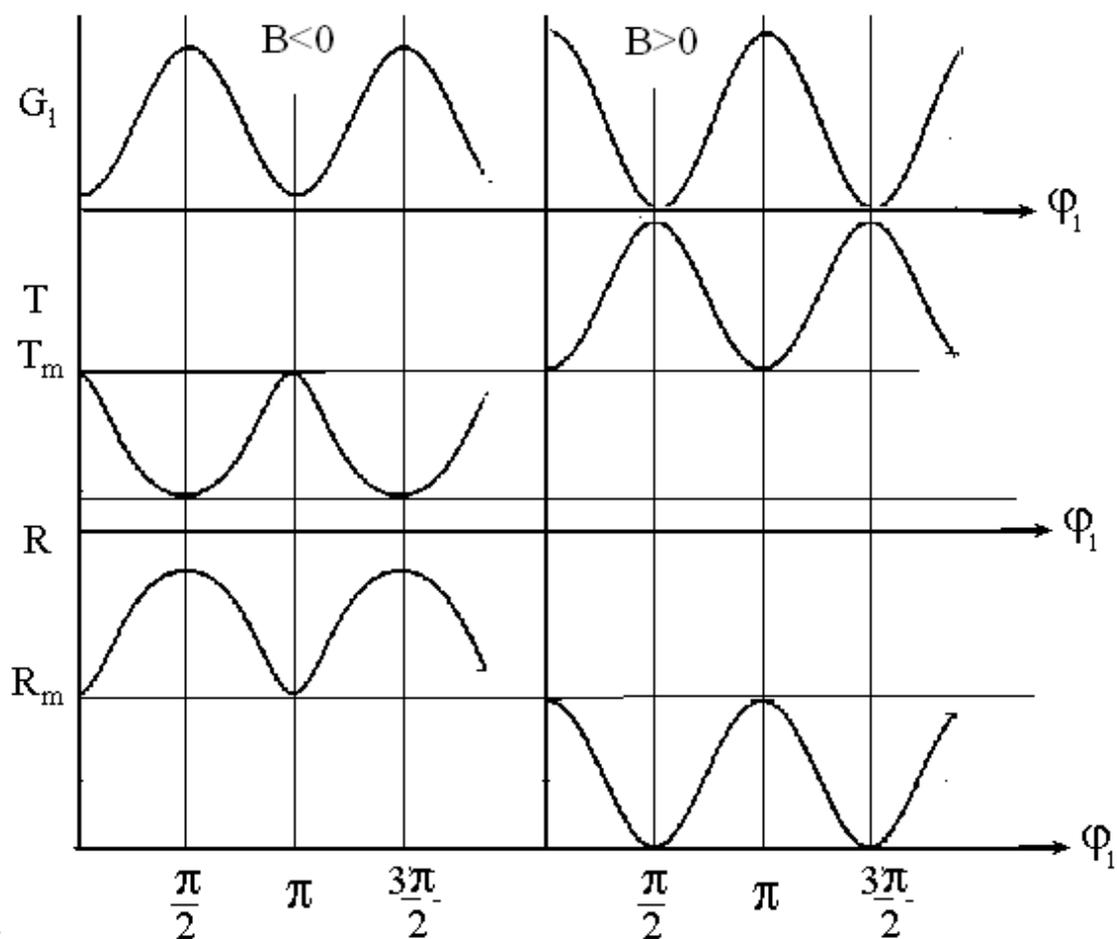


Рис. 1.3. Зависимости энергетических коэффициентов отражения и пропускания, а также функции G_1 от фазовой толщины слоя.

Определим, когда $B > 0$, т.е. тот случай, когда отражение от границы раздела уменьшается. Коэффициент B будет положительным, если $n_0 < n_1 < n_m$; и, соответственно, отрицательным, при $n_1 > n_m$, $n_0 < n_1$.

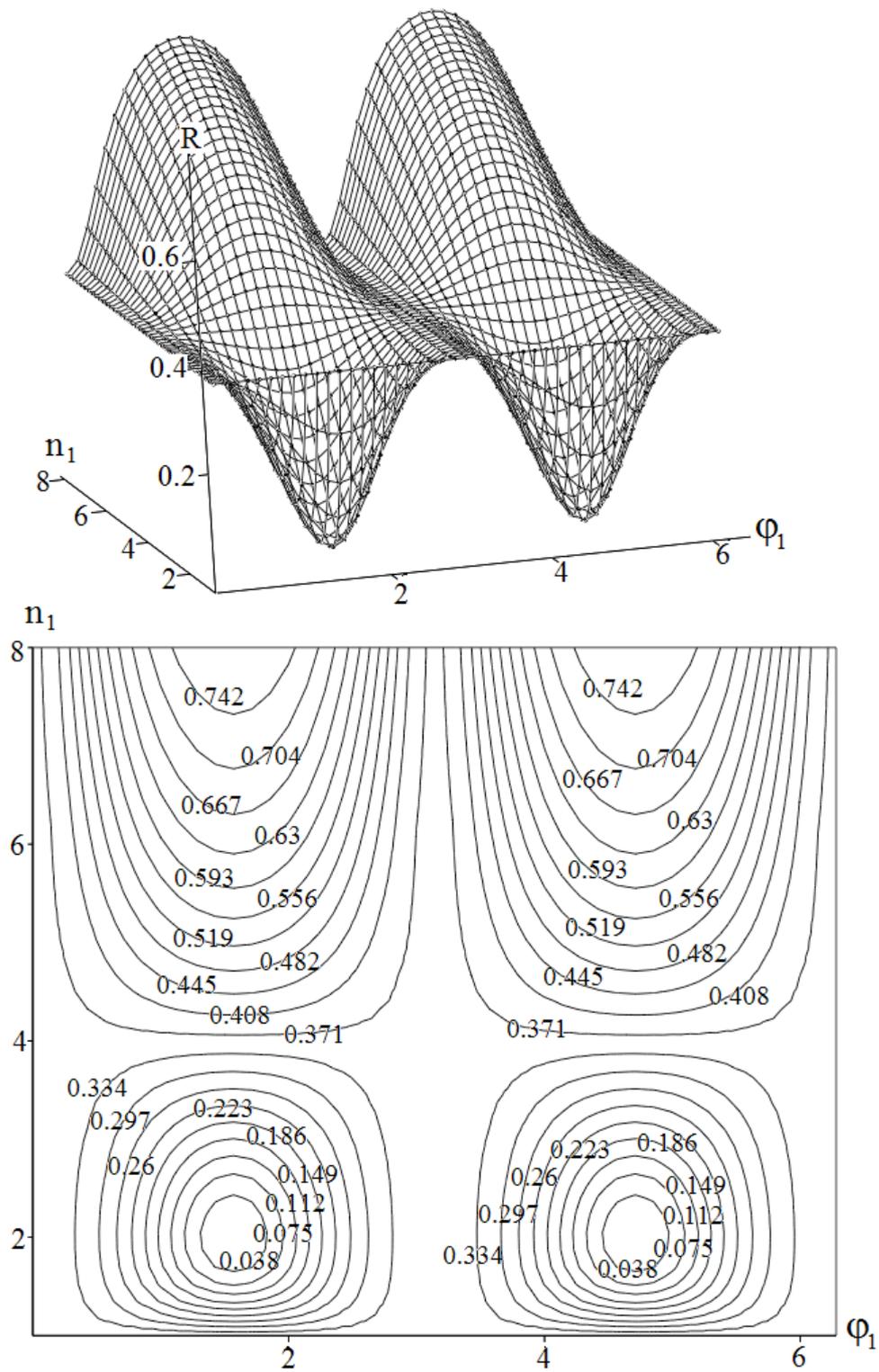


Рис. 1.4. Зависимость энергетического коэффициента отражения от фазовой толщины и показателя преломления слоя, расположенного между средами с показателями преломления $n_0=1$, $n_m=4$.

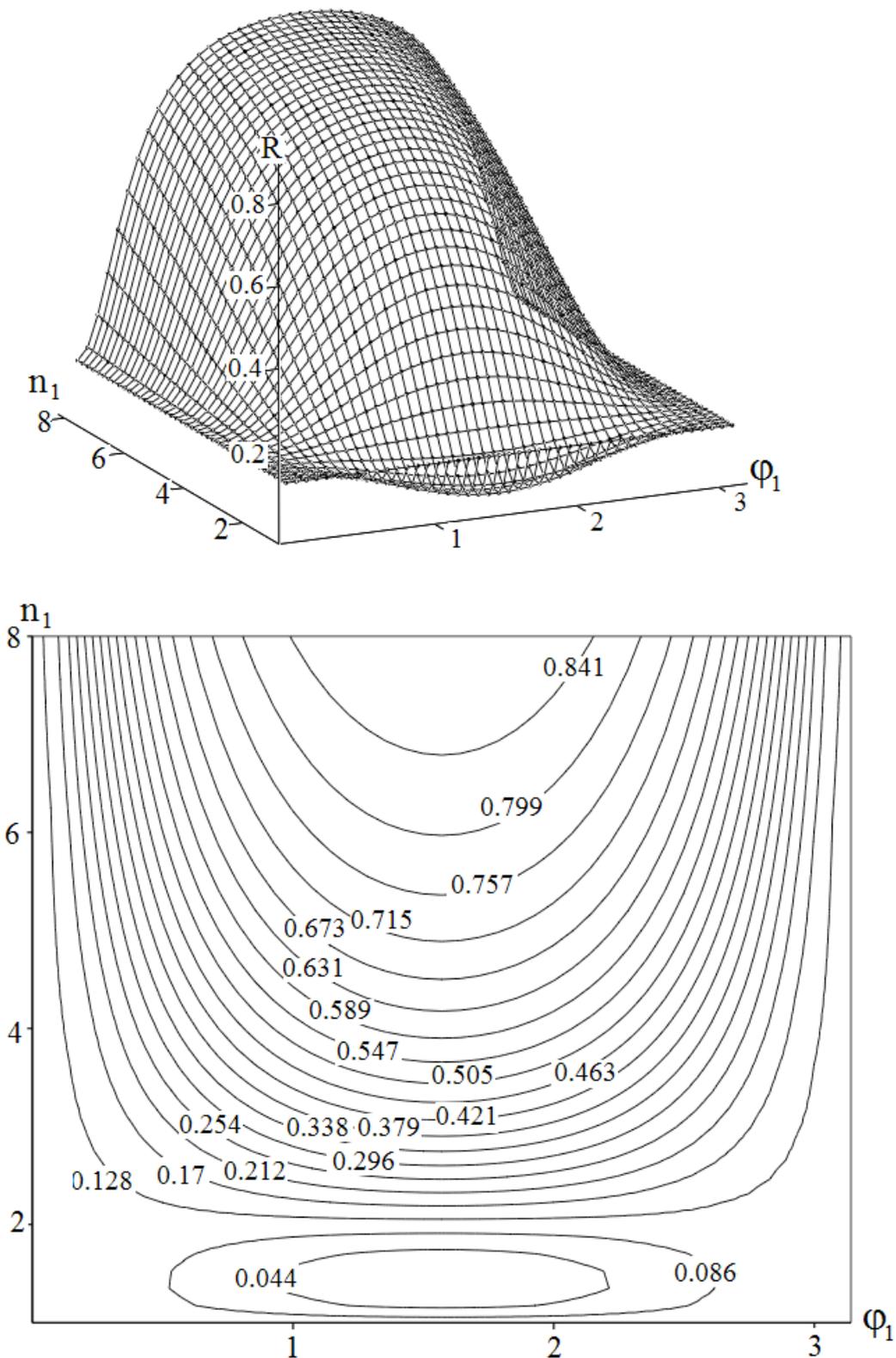


Рис. 1.5. Зависимость энергетического коэффициента отражения от фазовой толщины и показателя преломления слоя, расположенного между средами с показателями преломления $n_0=1$, $n_m=2$.

Если показатель преломления слоя удовлетворяет условию $n_0 < n_1 < n_m$ ($B > 0$), то при увеличении фазовой толщины слоя

коэффициент отражения уменьшается, пропускание при увеличении фазовой толщины возрастает. Наоборот, когда $B < 0$, т.е. когда n_1 лежит вне интервала $n_0 n_m$, коэффициент отражения увеличивается при увеличении фазовой толщины в некотором интервале, а затем снова падает. Величина энергетического коэффициента отражения при фазовой толщине слоя $0,5\pi$

равна: $R = \left(\frac{n_1^2 - n_0 n_m}{n_1^2 + n_0 n_m} \right)^2$, при фазовой толщине слоя, кратной π она равна:

$$R = \left(\frac{n_0 - n_m}{n_0 + n_m} \right)^2$$

Функции изменения энергетических коэффициентов отражения и пропускания периодические и период их изменения равен π (рис. 1.4).

Однослойные системы могут, как уменьшать коэффициент отражения оптического элемента, на поверхность которого они нанесены, так и увеличивать его. Иллюстрацией этих положений служат рисунки 1.4 и 1.5, на которых изображена трёхмерная зависимость коэффициента отражения от показателя преломления слоя (n_1) и фазовой толщины слоя (φ_1) для слоя, сформированного на подложках с показателем $n_m=4$ (рис. 1.4) и $n_m=2$ (рис. 1.5).

Наибольший интерес представляет не зависимость энергетических коэффициентов отражения и пропускания от фазовой толщины слоя, а зависимость их от оптической или геометрической толщины слоя. Поскольку показатель преломления внутри слоя постоянен, то зависимости от оптической и от геометрической толщины слоя будут одинаковыми с точностью до постоянного множителя. Интересна так же зависимость этих величин от длины волны падающего излучения, т.е. спектральная зависимость коэффициента отражения и пропускания при постоянной толщине слоя. Имея зависимости энергетических коэффициентов отражения и пропускания от фазовой толщины слоя можно легко построить зависимость от оптической толщины слоя при постоянной длине волны падающего излучения. Экстремумы коэффициентов отражения и пропускания будут наблюдаться при оптических толщинах, соответствующих фазовой толщине слоя $k\pi/2$. Если рассмотреть ситуацию, когда $k=1$, и некоторую фиксированную длину волны λ_0 , то оптическая толщина слоя, при которой будет наблюдаться экстремум, может быть определена из следующего соотношения:

$$\varphi = \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda_0} = \frac{\pi}{2}$$

следовательно:

$$n_1 d_1 = \lambda_0/4$$

В этом случае экстремумы отражения и пропускания будут наблюдаться при оптической толщине слоя $n_1 d_1$ равной $\lambda_0/4$ – это первый

экстремум. Второй экстремум ($k=2$) будет наблюдаться при оптической толщине слоя $n_1 d_1 = \lambda_0/2$, что соответствует фазовой толщине слоя π . Если мы хотим посмотреть, что будет дальше, то приравняем фазовую толщину $3/2 \pi$, 2π и т.д. Тогда можно написать, что экстремумы, в которых отражение и пропускание слоя отличается от отражения (пропускания) подложки, будут наблюдаться при толщинах слоя, кратных $(2k+1)\lambda_0/4$, а экстремумы, в которых отражение (пропускание) слоя совпадает с отражением (пропусканием) подложки при $(k \lambda_0/2)$. На основе этого легко построить зависимость энергетического коэффициента отражения от оптической толщины слоя. Зависимости энергетических коэффициентов отражения и пропускания слоя на подложке от толщины слоя при различных показателях преломления слоя изображены на рис.1.6.

Эти зависимости представляют существенный интерес при фотометрическом контроле толщин слоёв в процессе их формирования. Видно, что если толщина слоя растёт, то коэффициент отражения будет меняться по-разному, в зависимости от соотношений между показателем преломления слоя и подложки, на котором он формируется.

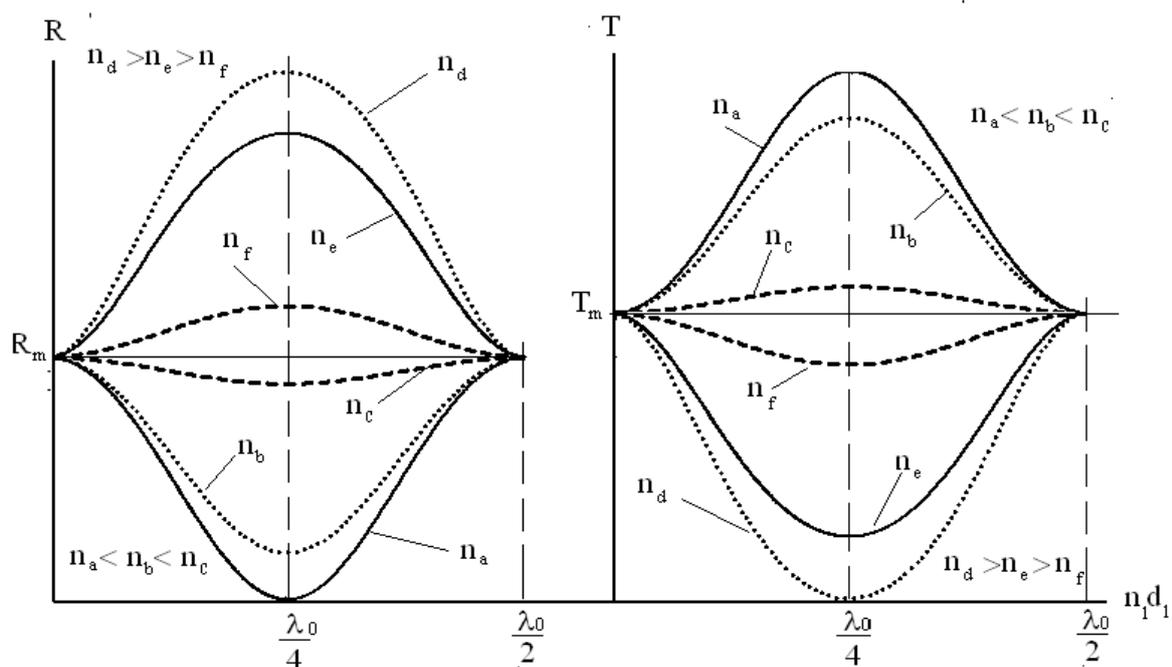


Рис. 1.6. Зависимость энергетических коэффициентов отражения и пропускания от толщины слоя при различных значениях показателя преломления этого слоя. Показатели преломления слоя n_a , n_b , n_c находятся в интервале (n_0, n_m) , показатели преломления n_d , n_e , n_f больше чем показатель преломления подложки $(n)_m$.

Сформированный слой имеет постоянную толщину. Для определённости положим, что $n_1 d_1 = \lambda_0/4$, т.е. на длине волны $\lambda = \lambda_0$ мы имеем либо минимум, либо максимум. На основе всё той же зависимости

от фазовой толщины слоя можно построить зависимость энергетических коэффициентов отражения или пропускания от длины волны.

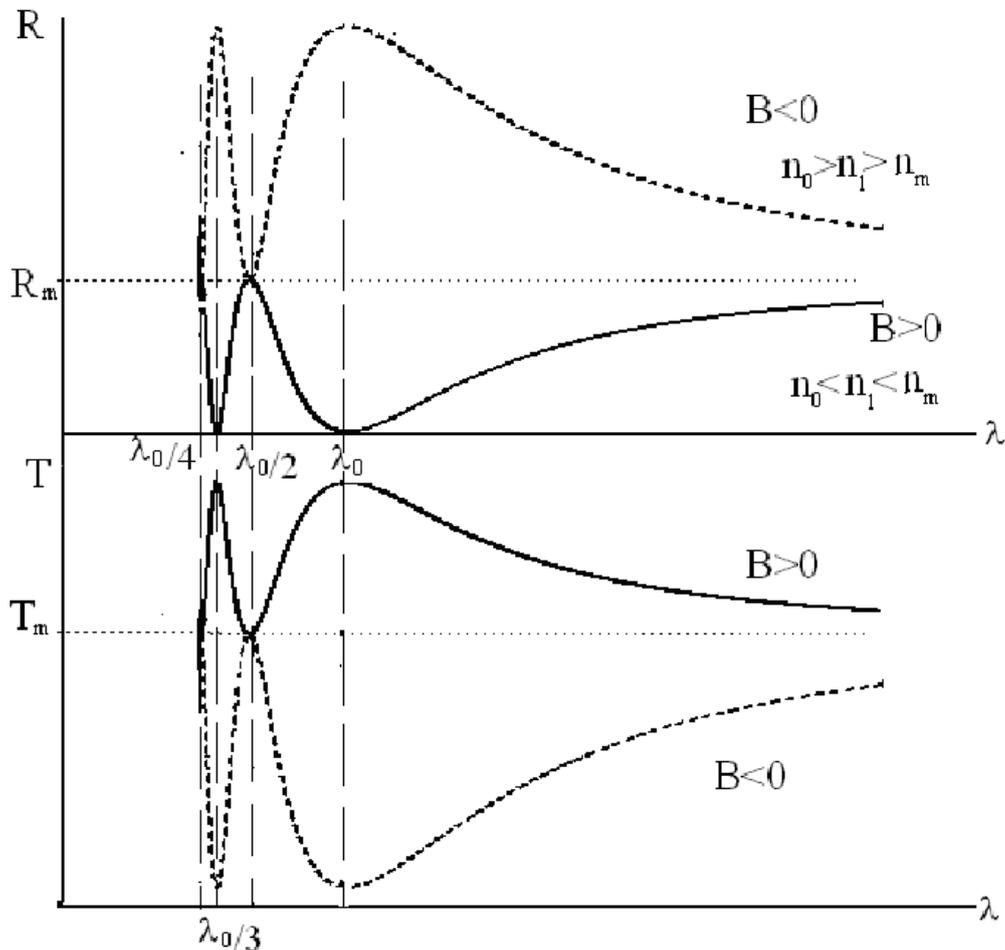


Рис.1.7. Спектральные зависимости энергетических коэффициентов отражения и пропускания слоя, показатель преломления которого лежит в интервале $n_0 < n_1 < n_m$ ($B > 0$) и $n_1 > n_m$ ($B < 0$), $n_0 < n_m$.

На рис. 1.7 показаны зависимости энергетических коэффициентов отражения и пропускания от длины волны падающего излучения. Длина волны изменяется в достаточно широком диапазоне. Экстремум наблюдается при фазовой толщине слоя $\pi/2$, а соответственно длина волны, которая соответствует экстремуму отражения, может быть найдена из выражения для фазовой толщины слоя. В случае, когда фазовая толщина слоя $\varphi_1 = \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\lambda_0}{\lambda} = \frac{\pi}{2}$, коэффициент отражения имеет максимальное или минимальное значение на длине волны, равной λ_0 в зависимости от показателя преломления слоя. Если фазовая толщина слоя π , то длина волны, для которой наблюдается этот экстремум отражения, будет равна $\lambda_0/2$. отметим на графике точки соответствующие экстремумам.

В точке λ_0 наблюдается дин экстремум, в $\lambda_0/2$ другой, максимум или минимум будет определяться соотношениями показателей преломления подложки и плёнки. Проанализируем поведение спектральных кривых в длинноволновой и коротковолновой областях спектра. Чему соответствует длинноволновая область в диапазоне фазовых толщин? Это область от 0 до $\pi/2$. Далее следует определить, какой длине волны соответствует фазовая толщина, равная нулю? Очевидно, бесконечности. Если длина волны равна бесконечности, то фазовая толщина слоя равна нулю. Это значит, что для излучения с бесконечно большой длиной волны любой слой отсутствует. Коэффициент отражения здесь будет вести себя следующим образом: он будет асимптотически приближаться к коэффициенту отражения непокрытого стекла. Область фазовых толщин слоя больших $\pi/2$ отвечает за коротковолновую часть спектра. В коротковолновой части спектра мы будем иметь уже не периодическую, а некую функцию с убывающими интервалами, где коэффициент отражения осциллирует. Экстремумы, соответствующие фазовым толщинам, кратным нечётному числу $\pi/2$, будут наблюдаться при $\frac{\lambda_0}{2k+1}$, а чётному - $\frac{\lambda_0}{2k}$, $k=0,1,2,\dots$.

Содержание работы

1. Произвести испарение диоксида циркония до пятого экстремума пропускания на длине волны 560 нм.
2. Произвести измерение пропускания данного образца на спектрофотометре СФ-26, СФ -46 в диапазоне длин волн (380-990) нм.
3. Построить график зависимости $T = f(\lambda)$.
4. Определить оптическую толщину и показатель преломления осаждённого слоя, используя спектральную зависимость $T = f(\lambda)$, помня, что $T+R=1$.
5. Произвести испарение диоксида циркония до пятого экстремума пропускания на длине волны 600 нм.
6. Повторить пункты 2, 3, 4.
7. Произвести испарение диоксида кремния до пятого экстремума пропускания на длине волны 560 нм.
8. Повторить пункты 2, 3, 4.
9. Произвести испарение диоксида кремния до пятого экстремума пропускания на длине волны 600 нм.
10. Повторить пункты 2, 3, 4.
11. Составить краткий технологический процесс изготовления однослойных диэлектрических покрытий,
12. Записать для каждого слоя величину тока накала катода (J_n), ускоряющее напряжение (U), величину тока эмиссии (J_e), время прогрева испаряемого вещества, время осаждения испаряемого

вещества, а так же изменение отсчетов на СФКТ-751, давление в вакуумной камере до начала осаждения слоя, во время формирования слоя и после окончания осаждения вещества, длину волны (λ_0), на которой производился контроль изменения коэффициента пропускания во время осаждения слоя.

Методические указания и порядок выполнения работы

Произвести осаждение слоя, согласно методическим указаниям, изложенным в приложении. Работа выполняется с использованием электронно-лучевого испарителя.

Сравнить кривые пропускания полученных однослойных диэлектрических покрытий, провести анализ положения экстремумов в шкале длин волн и определить величину пропускания в экстремуме.

Оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Схему ЭЛИ.
3. Спектральные кривые всех изготовленных образцов.
4. Длины волн, на которой производился контроль толщины слоя осаждаемого покрытия.
5. Краткий технологический процесс изготовления однослойных диэлектрических покрытий.
6. Значения показателя преломления и оптической толщины изготовленного слоя в длинах волн, соответствующих экстремумам пропускания.
7. Выводы о проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Факторы, влияющие на значения величин показателей преломления диэлектрических слоёв.
2. Что определяет величину экстремуму пропускания однослойного покрытия
3. Принцип работы ЭЛИ.
4. Принцип работы СФКТ-751.
 5. Какова точность измерения пропускания при использовании спектрофотометров СФ-26, СФ-46
 6. Чем определяется точность измерения пропускания однослойных покрытий при использовании спектрофотометров СФ-26, СФ-46
 7. Какова точность измерения длины волны при использовании спектрофотометров СФ-26, СФ-46

8. Чем определяется точность измерения длины волны при использовании спектрофотометров СФ-26, СФ-46?
9. Каковы границы прозрачности оптических стекол?
10. Как зависит величина показателя преломления слоя от экстремальных энергетических коэффициентов отражения или пропускания.
11. Как влияет дисперсия показателя преломления слоя на величину коэффициентов отражения и пропускания.

Основная литература

1. Путилин Э.С. Оптические покрытия. СПб. СПб ГУ ИТМО, 2010. 210с.
2. Гайнутдинов И.С., Несмелов Е.А., Михайлов А.В., Иванов В.П., Абзалова Г.И. Свойства и методы получения интерференционных покрытий для оптического приборостроения. Казань. Фэн 2003 423с.

Дополнительная литература:

1. Гайнутдинов И.С., Несмелов Е.А., Хайбуллин И.Б.. Интерференционные покрытия для оптического приборостроения. Казань. Фэн, 2002 591с
2. Беннет Х.Е., Беннет Дж.М. Прецизионные измерения в оптике тонких плёнок. Физика тонких плёнок. Под ред. Хасса Г. и Туна Р.Э. М. Мир, 1970. т.4 с.7-122.
3. Берндт К.Г. Методы контроля и измерения толщины тонких пленок и способы получения, пленок, однородных по толщине. Физика тонких пленок под ред. Хасса Г. М., Мир, 1963. Т3. С.7-57.

Лабораторная работа № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ОСАЖДЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СЛОЁВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕЙТРАЛЬНЫХ СВЕТОФИЛЬТРОВ

Цель работы - исследование оптических свойств металлических слоёв в зависимости от условий осаждения, изготовление нейтральных светофильтров на основе титана методом электронно-лучевого испарения в вакууме. Измерение спектральных характеристик металлических слоёв разной толщины, изготовленных при различных условиях испарения. Составление краткого технологического процесса нанесения полупрозрачных металлических слоёв.

Теоретическая часть

При работе спектральных приборов необходимо использовать оптические элементы, равномерно ослабляющие световой поток в широком спектральном диапазоне. Ослабление светового потока характеризуется величинами энергетических коэффициентов отражения и пропускания. Решение этой задачи может быть реализовано как с помощью нейтральных стекол, так и бесцветных стекол с осажденными на них полупрозрачными слоями металла.

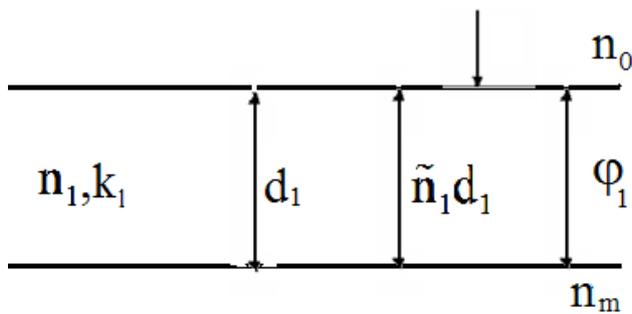


Рис. 2.1 Схема поглощающего однослойного покрытия.

При наличии поглощения в слое амплитудный и энергетический коэффициенты отражения могут быть вычислены по формулам (1.1) - (1.3), однако, элементы матрицы интерференции в отличие от (1.2) будут комплексными числами:

$$m_{11} = m_{22} = \cos \tilde{\varphi}_1,$$

$$m_{12} = (\tilde{n}_1)^{-1} \sin \tilde{\varphi}_1, \quad m_{21} = \tilde{n}_1 \sin \tilde{\varphi}_1,$$

где $\tilde{n}_1 = n_1 - ik_1$, $\tilde{\varphi}_1 = 2\pi n_1 d_1 (\lambda)^{-1}$, n_1 - показатель преломления, k_1 - коэффициент поглощения слоя.

Определим оптические характеристики света, отражённого и прошедшего через покрытие, частично поглощающее свет (рис.2.1). Такое покрытие характеризуется показателем преломления (n_1), коэффициентом

поглощения (k_1), геометрической толщиной (d_1), а так же оптической ($(n_1 - ik_1) \cdot d_1$) и фазовой (φ_1) толщинами. Пусть плоская волна падает на такую систему по нормали, все ограничения остаются: слой бесконечно протяжённый, волновой фронт тоже бесконечно протяжённый, слой однородный, изотропный, по толщине показатель преломления и коэффициент поглощения не меняются. Когда излучение попадает на первую границу раздела, здесь оно частично отражается (амплитудный коэффициент отражения r_1), частично проходит, но поскольку в слое есть поглощение, то амплитуда излучения ослабляется при прохождении слоя. На второй границе раздела (амплитудный коэффициент отражения r_2), часть излучения отражается, снова проходит этот слой, снова ослабляется, получаются всё время ослабляющиеся пучки. В этом случае, амплитудный коэффициент отражения света слоем можно записать в виде:

$$r = \frac{r_1 + r_2 \exp(-2i\varphi_1)}{1 + r_1 r_2 \exp(-2i\varphi_1)}; \quad (2.1)$$

где: r_1, r_2 – френелевские коэффициенты отражения первой и второй границ раздела, равные:

$$r_1 = \frac{n_0 - (n_1 - ik_1)}{n_0 + (n_1 - ik_1)} = \frac{n_0 - n_1 + ik_1}{n_0 + n_1 - ik_1},$$

$$r_2 = \frac{n_1 - ik_1 - n_m}{n_1 - ik_1 + n_m} = \frac{n_1 - n_m - ik_1}{n_1 + n_m - ik_1}.$$

Поскольку r_1 и r_2 - комплексные величины, то их можно записать в следующем виде:

$$r_1 = |r_1| \exp(i\rho_1) \text{ и } r_2 = |r_2| \exp(i\rho_2). \quad (2.2)$$

Величины ρ_1 и ρ_2 будут аргументами функций r_1 и r_2 .

$$\rho_1 = \arctg \frac{2n_0 k_1}{n_1^2 - n_0^2 + k_1^2},$$

$$\rho_2 = \arctg \frac{2n_m k_1}{n_m^2 - n_1^2 + k_1^2},$$

$$|r_1|^2 = \frac{(n_0 - n_1)^2 + k_1^2}{(n_0 + n_1)^2 + k_1^2}, \quad |r_2|^2 = \frac{(n_1 - n_m)^2 + k_1^2}{(n_1 + n_m)^2 + k_1^2}. \quad (2.3)$$

Выражение для амплитудного коэффициента отражения можно записать в следующем виде:

$$r = \frac{|r_1| e^{i\rho_1} + |r_2| \exp\left(-2i\left(\frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} + \rho_2\right)\right) \exp\left(-\frac{4\pi k_1 d_1}{\lambda}\right)}{1 + |r_1| |r_2| \exp\left(-2i\left(\frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} + \rho_2 + \rho_1\right)\right) \exp\left(-\frac{4\pi k_1 d_1}{\lambda}\right)}. \quad (2.4)$$

Выражение (2.4) показывает, что в отличие от не поглощающей системы перед фазовым множителем присутствует ещё один множитель, который определяет ослабление амплитуды излучения, проходящего через слой. Учитывая 2.4, можно легко написать выражения, определяющие энергетический коэффициент отражения поглощающего слоя:

$$R = |r|^2 = \frac{|r_1|^2 - 2|r_1||r_2| \exp\left(-\frac{4\pi k_1 d_1}{\lambda}\right) \times \cos\left(\frac{4\pi n_1 d_1}{\lambda} + \rho_2 + \rho_1\right) + |r_2|^2 \exp\left(-\frac{8\pi k_1 d_1}{\lambda}\right)}{1 + |r_1||r_2| \exp\left(-\frac{8\pi k_1 d_1}{\lambda}\right) - 2|r_1||r_2| \exp\left(-\frac{4\pi k_1 d_1}{\lambda}\right) \times \cos\left(\frac{4\pi n_1 d_1}{\lambda} + \rho_2 + \rho_1\right)} \quad (2.5)$$

и энергетический коэффициент пропускания $T = \frac{n_m}{n_0} |t|^2$:

$$T = \frac{A \exp\left(-\frac{2\pi k_1 d_1}{\lambda}\right)}{1 + |r_1|^2 |r_2|^2 \exp\left(-\frac{8\pi k_1 d_1}{\lambda}\right) - 2|r_1||r_2| \exp\left(-\frac{4\pi k_1 d_1}{\lambda}\right) \cos\left(\frac{4\pi n_1 d_1}{\lambda} + \rho_1 + \rho_2\right)}, \quad (2.6)$$

где:
$$A = 16n_0 n_m \frac{1}{(n_0 + n_1)^2 + k_1^2} \cdot \frac{(n_1^2 + k_1^2)}{(n_1 + n_m)^2 + k_1^2}.$$

Следует отметить, что эти величины зависят от длины волны и от оптических постоянных слоя.

Анализ выражений для энергетических коэффициентов отражения и пропускания, показывает, что экстремумы коэффициента отражения и экстремумы коэффициента пропускания не совпадают в шкале длин волн или в шкале частот. Для определения положения экстремумов в шкале длин волн надо написать производные энергетических коэффициентов отражения и пропускания по длине волны или по фазовой толщине слоя:

$\frac{dT}{d\lambda}$ и $\frac{dR}{d\lambda}$ или $\frac{dT}{d\varphi}$ и $\frac{dR}{d\varphi}$, и приравнять их нулю. После анализа этих выражений можно увидеть, что положения длин волн, соответствующие экстремумам пропускания и отражения различаются.

В случае поглощающего слоя происходит смещение минимумов отражения относительно максимумов пропускания. В этом легко убедиться, рассмотрев закон сохранения энергии для такой системы:

$R + T + A = 1$, где A - энергетический коэффициент поглощения. Если продифференцировать это выражение по длине волны, получим:

$$\frac{dT}{d\lambda} + \frac{dR}{d\lambda} + \frac{dA}{d\lambda} = 0, \quad (2.7)$$

если приравнять $\frac{dR}{d\lambda} = 0$, то $\frac{dT}{d\lambda} = -\frac{dA}{d\lambda}$, следовательно, и положения экстремумов отражения, пропускания и поглощения в шкале длин волн не совпадают. Аналогичный результат легко может быть получен с использованием матричного представления.

Фазовая толщина слоя при наличии поглощения определяется следующим образом:

$$\varphi = \frac{2\pi(n_1 - ik_1)d_1}{\lambda} = \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \left(1 - i \frac{k_1}{n_1} \right).$$

Все элементы матрицы интерференции становятся комплексными величинами. Действительно:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{11} = m_{22} = \cos \varphi_1 = \cos \left(\frac{2\pi(n_1 - ik_1)d_1}{\lambda} \right) = \cos \left(\frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} - \frac{2i\pi d_1 k_1}{\lambda} \right), \\ m_{12} = \frac{1}{\tilde{n}_1} \sin \varphi_1 = \frac{1}{(n_1 - ik_1)} \sin \left(\frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} - \frac{2i\pi d_1 k_1}{\lambda} \right), \\ m_{21} = \tilde{n}_1 \sin \varphi_1 = (n_1 - ik_1) \sin \left(\frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} - \frac{2i\pi d_1 k_1}{\lambda} \right). \end{array} \right. \quad (2.8)$$

Если раскрыть значения круговых функций по правилам разложения их по разности двух углов и перейти к гиперболическим функциям, то получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{11} = m_{22} = \cos \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \operatorname{ch} \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \cdot \frac{k_1}{n_1} + i \sin \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \operatorname{sh} \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \cdot \frac{k_1}{n_1}, \\ m_{12} = \\ = \frac{1}{n_1^2 + k_1^2} \left[\left(n_1 \sin \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \operatorname{ch} \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \cdot \frac{k_1}{n_1} + k_1 \cos \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \operatorname{sh} \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \cdot \frac{k_1}{n_1} \right) - \right. \\ \left. - i \left(n_1 \cos \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \operatorname{sh} \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \cdot \frac{k_1}{n_1} - k_1 \sin \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \operatorname{ch} \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \cdot \frac{k_1}{n_1} \right) \right] \\ m_{21} = n_1 \sin \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \operatorname{ch} \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \cdot \frac{k_1}{n_1} - k_1 \cos \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \operatorname{sh} \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \cdot \frac{k_1}{n_1} - \\ - i \left(n_1 \cos \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \operatorname{sh} \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \cdot \frac{k_1}{n_1} + k_1 \sin \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \operatorname{ch} \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \cdot \frac{k_1}{n_1} \right). \end{array} \right. \quad (2.9)$$

Амплитудные коэффициенты отражения и пропускания слоя при наличии поглощения имеют вид:

$$\begin{cases} r = \frac{(n_0 - n_m)m_{11} + i(n_0 n_m m_{12} - m_{21})}{(n_0 + n_m)m_{11} + i(n_0 n_m m_{12} + m_{21})}, \\ t = \frac{2n_0}{(n_0 + n_m)m_{11} + i(n_0 n_m m_{12} + m_{21})}. \end{cases} \quad (2.10)$$

Энергетические коэффициенты отражения, пропускания и поглощения:

$$\begin{cases} R = |r|^2, \\ T = \frac{n_m}{n_0} |t|^2, \\ A = 1 - R - T. \end{cases} \quad (2.11)$$

Анализ выражений для энергетических коэффициентов отражения, пропускания и поглощения слоя при наличии в нём поглощения в общем виде, в виду громоздкости выражений (2.5), (2.6) и (2.11), представляет значительные сложности. Поэтому можно рассмотреть два предельных случая, которые легко могут быть проанализированы.

Вначале рассмотрим случай, когда коэффициент поглощения слоя большой, т.е. когда величина $k_1 \gg 1$. В этом случае коэффициент отражения равен коэффициенту отражения передней границы раздела (2.5). Энергетический коэффициент отражения равен r_1^2 , вторая граница практически не работает, свет полностью поглощается в слое. Всё определяется только оптическими постоянными этого слоя, именно так работают металлические зеркала. Работает только первая граница раздела, никаких интерференционных эффектов в этой плёнке не наблюдается, ввиду того, что все рассмотренные величины определяются экспоненциальным множителем в (2.5). Для того, что бы слой работал, как зеркальное покрытие толщина плёнки должна быть такой, чтобы множитель $\exp(-2\pi k_1 d_1 (\lambda)^{-1})$ был бы порядка 10^{-2} .

Энергетический коэффициент отражения и поглощения тонкой плёнки при падении со стороны среды с показателем преломления n_0 равен:

$$\begin{cases} R = \frac{(n_0 - n_1)^2 + k_1^2}{(n_0 + n_1)^2 + k_1^2}, \\ A = \frac{4n_0 n_1}{(n_0 + n_1)^2 + k_1^2}. \end{cases} \quad (2.12)$$

Очевидно, что если свет падает со стороны подложки, то

$$\left\{ \begin{array}{l} R' = \frac{(n_m - n_1)^2 + k_1^2}{(n_m + n_1)^2 + k_1^2}, \\ A' = \frac{4n_0 n_1}{(n_m + n_1)^2 + k_1^2}. \end{array} \right. \quad (2.13)$$

Сравнивая энергетические коэффициенты отражения при падении излучения с разных сторон слоя (при $n_0 < n_m$) видно, что $R > R'$, а $A < A'$.

Для случая очень тонких слоёв, $\varphi_1 = 2\pi d_1 n_1 (\lambda)^{-1} \ll 1$, элементы матрицы интерференции имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{11} = m_{22} \ll 1, \\ m_{12} = \varphi_1 \cdot n_1^{-1}, \\ m_{21} = n_1 \varphi_1 \left[1 - (k_1 \cdot n_1^{-1})^2 + 2i(k_1 \cdot n_1^{-1}) \right]. \end{array} \right. \quad (2.14)$$

При написании этих выражений, членами второго порядка малости по величине φ_1 можно пренебречь.

Амплитудные коэффициенты отражения при падении излучения из сред с показателями преломления n_0, n_m , которые были обозначены как r и r' , соответственно, равны:

$$\left\{ \begin{array}{l} r = \frac{n_1(n_0 - n_m - 2k_1\varphi_1) + (n_0 n_m - n_1^2 + k_1^2)\varphi_1}{n_1(n_0 + n_m + 2k_1\varphi_1) + (n_0 n_m + n_1^2 - k_1^2)\varphi_1}, \\ r' = \frac{n_1(n_m - n_0 - 2k_1\varphi_1) + (n_0 n_m - n_1^2 + k_1^2)\varphi_1}{n_1(n_m + n_0 + 2k_1\varphi_1) + (n_0 n_m + n_1^2 - k_1^2)\varphi_1}. \end{array} \right. \quad (2.15)$$

При $n_0 < n_m$, видно, что величина r' может обращаться в ноль, при:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_1 = \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} = n_m - n_0, \\ n_0 n_m = n_1^2 - k_1^2. \end{array} \right. \quad (2.16)$$

Для металлов с большим коэффициентом отражения (серебро, алюминий, золото, медь) второе условие никогда не выполняется. Однако, для умеренно отражающих металлов (хром, титан) это условие может быть выполнено. Тогда при толщине плёнки $d_1 = \lambda(n_m - n_0)/2\pi n_1$ коэффициент отражения при падении света со стороны подложки обращается в ноль (рис. 2.2).

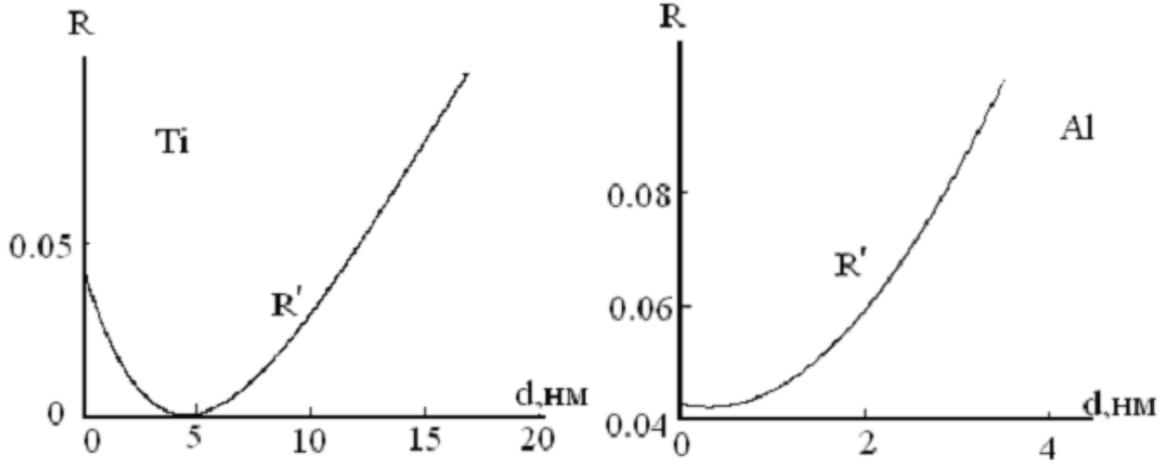


Рис. 2.2. Зависимости энергетических коэффициентов отражения со стороны подложки для слоёв, изготовленных из титана ($n_1=2.26$, $k_1=1.77$, $\lambda=550\text{nm}$) и алюминия ($n_1=0.14$, $k_1=2.35$, $\lambda=220\text{nm}$), в зависимости от толщины слоя.

Энергетические коэффициенты отражения, пропускания и поглощения тонкой поглощающей плёнки при падении света со стороны среды с показателем преломления n_0 и со стороны подложки n_m равны:

$$\left\{ \begin{array}{l} R = \frac{(n_0 - n_m - 2k_1\varphi_1)^2 n_1^2 + (n_0 n_m - n_1^2 + k_1^2) \varphi_1^2}{(n_0 + n_m + 2k_1\varphi_1) n_1^2 + (n_0 n_m + n_1^2 - k_1^2) \varphi_1^2}, \\ R' = \frac{(n_m - n_0 - 2k_1\varphi_1)^2 n_1^2 + (n_0 n_m - n_1^2 + k_1^2) \varphi_1^2}{(n_0 + n_m + 2k_1\varphi_1) n_1^2 + (n_0 n_m + n_1^2 - k_1^2) \varphi_1^2}, \\ T = T' = \frac{4n_0 n_m n_1^2}{(n_0 + n_m + 2k_1\varphi_1) n_1^2 + (n_0 n_m + n_1^2 - k_1^2) \varphi_1^2}, \\ A = \frac{4k_1^2 (2n_0 + k_1\varphi_1) n_1^2 \varphi_1}{(n_0 + n_m + 2k_1\varphi_1) n_1^2 + (n_0 n_m + n_1^2 - k_1^2) \varphi_1^2}, \\ A' = \frac{4k_1^2 (2n_m + k_1\varphi_1) n_1^2 \varphi_1}{(n_0 + n_m + 2k_1\varphi_1) n_1^2 + (n_0 n_m + n_1^2 - k_1^2) \varphi_1^2}; \end{array} \right. \quad (2.17)$$

где: R , T , A – коэффициенты отражения, пропускания и поглощения при падении света со стороны среды с показателем преломления n_0 , R' , T' , A' – коэффициенты отражения, пропускания и поглощения при падении света со стороны среды с показателем преломления n_m .

Разность энергетических коэффициентов отражения $R - R'$ равна:

$$R - R' = \frac{4k_1\varphi_1 (n_m - n_0) n_1^2}{(n_0 + n_m + 2k_1\varphi_1) n_1^2 + (n_0 n_m + n_1^2 - k_1^2) \varphi_1^2} > 0,$$

т.е. $R > R'$, а отношение A/A' есть:

$$\frac{A}{A'} = \frac{n_m + 0,5k_1\varphi_1}{n_0 - 0,5k_1\varphi_1} \approx \frac{n_m}{n_0}.$$

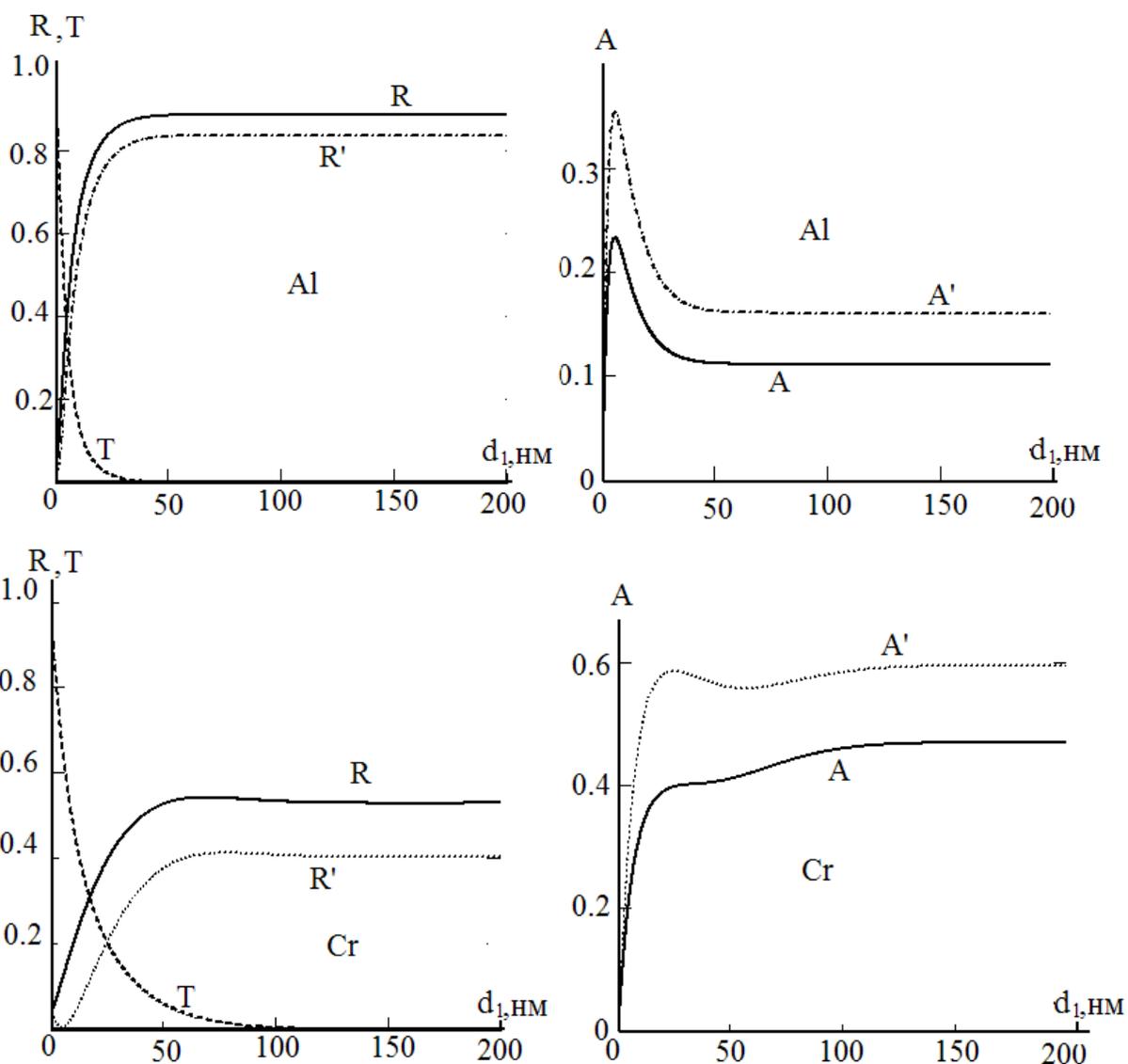


Рис. 2.3. Зависимости энергетических коэффициентов отражения, пропускания и поглощения для слоёв, изготовленных из алюминия ($n_1=1.55$, $k_1=7.00$, $\lambda=700\text{nm}$) и хрома ($n_1=2.04$, $k_1=2.85$, $\lambda=436\text{nm}$) в зависимости от толщины слоя.

Энергетические коэффициенты поглощения при падении из сред с показателем преломления n_m и n_0 , относятся как n_m/n_0 .

На рис. 2.3 и 2.4 изображены зависимости энергетических коэффициентов отражения, пропускания и поглощения при различных значениях n_1 и k_1 в зависимости от толщины слоя.

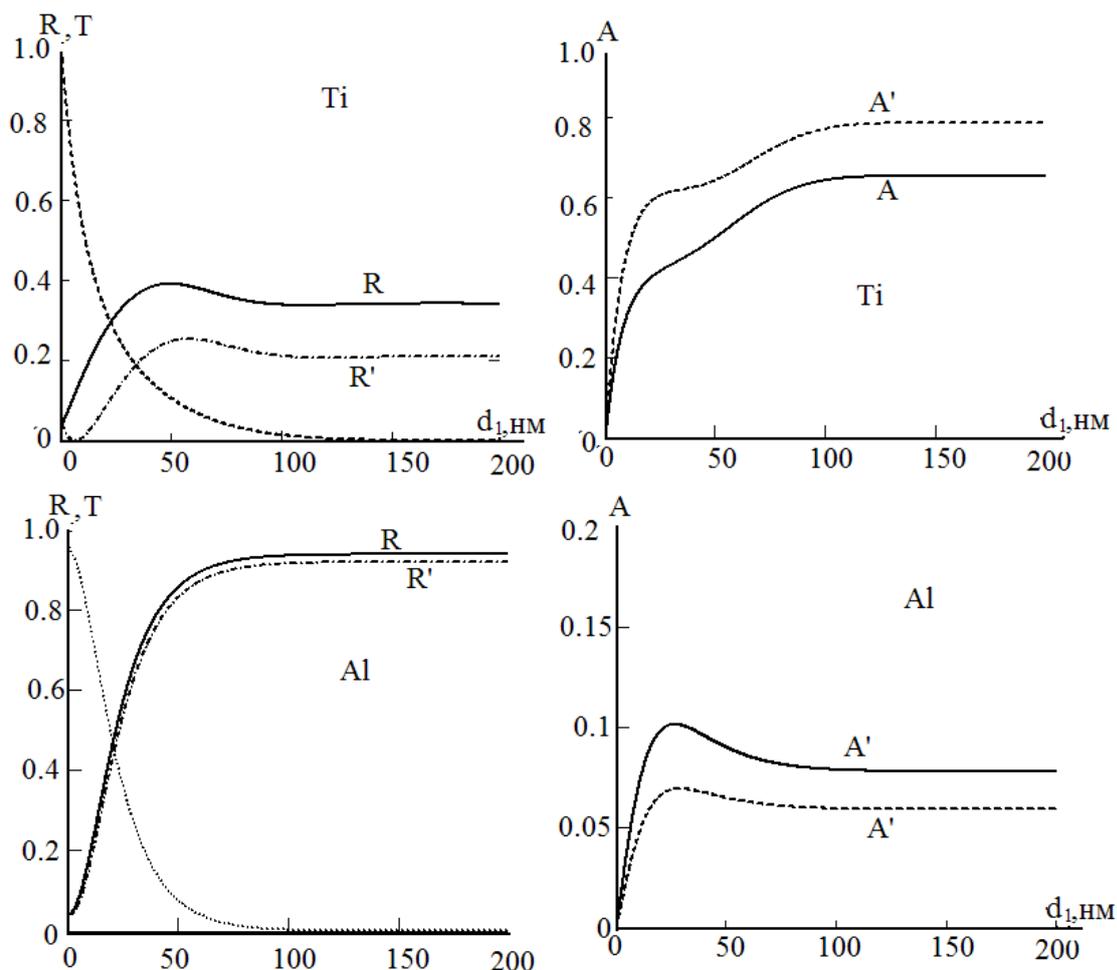


Рис. 2.4. Зависимости энергетических коэффициентов отражения, пропускания и поглощения для слоёв, изготовленных из титана ($n_1=2,26$, $k_1=1,77$, $\lambda=550$ нм) и алюминия ($n_1=0,14$, $k_1=2,35$, $\lambda=220$ нм) в зависимости от толщины слоя.

Энергетический коэффициент пропускания (см. рис. 2.3, 2.4.) меняется по экспоненциальной зависимости и с ростом толщины слоя монотонно убывает. Энергетический коэффициент отражения при падении света со стороны среды с меньшим показателем преломления монотонно возрастает до значения коэффициента отражения массивного материала. При падении со стороны среды с показателем преломления n_m (подложки), т.е. среды с большим показателем преломления коэффициент отражения R' вначале монотонно падает до нулевого или минимального отражения, а затем монотонно возрастает, причём $R < R'$.

Энергетический коэффициент поглощения для сильно отражающих металлов в области малых толщин достигает максимального значения, а затем падает до коэффициента поглощения массивного материала.

Толщина слоя, при котором A , A' имеют максимальное значение, может быть найдена из условия $\frac{\partial A}{\partial \varphi_1} = 0$; $\frac{\partial A'}{\partial \varphi_1} = 0$. При этом естественно, $A' > A$.

Металлы, используемые для формирования нейтральных, т.е. обладающих примерным постоянством пропускания в широкой спектральной области, светофильтров должны быть устойчивы к воздействию окружающей среды, механически прочны. Ширина спектральной области в зависимости от используемого металла может составлять видимый, ультрафиолетовый и видимый, ультрафиолетовый видимый и инфракрасный диапазоны спектра. Этим требованиям максимально удовлетворяет титан. Тонкие пленки на основе титана являются механически прочными, стабильны во времени, имеют постоянный энергетический коэффициент пропускания в широком спектральном диапазоне, лежащем в интервале от 400 до 1000 нм.

Титан имеет температуру плавления 1750°C при давлении 10^{-3} Па, поэтому для его осаждения предпочтительно электронно-лучевое испарение, оптические постоянные титана приведены в приложении. Все поглощающие слои очень чувствительны к условиям формирования пленок, поскольку определяющие их оптические параметры: показатель преломления и коэффициент поглощения зависят от структуры пленок. Определяющими факторами, оказывающими максимальное влияние на величину n и k , являются:

1. Степень разряжения в вакуумной камере.
2. Состав остаточных газов.
3. Чистота подложки, определяемая наличием на поверхности дефектов в виде царапин, выколов, точек (ОСТ 11141-84).
4. Химическая чистота поверхностей.
5. Наличие поверхностных напряжений.
6. Скорость изменения температуры подложки во время осаждения слоя.
7. Скорость осаждения пленкообразующего материала.
8. Степень химической чистоты пленкообразующего материала или постоянство химического состава в объеме пленкообразующего материалов при испарении сплавов.

Спектральные зависимости коэффициентов пропускания, отражения и поглощения, как это видно из (2.5) определяются оптическими постоянными металлов и их толщиной.

На рис. 2.5 приведены спектральные зависимости слоя титана различной толщины.

Как видно из рисунка с ростом толщины пленки увеличивается не только поглощение в ней, но и ее коэффициент отражения, при этом, для пленки титана фиксированной толщины характерно примерное постоянство коэффициента отражения и пропускания в широком спектральном диапазоне.

Испарение металла (сплав титана ВТ-4) из металлической мишени (детали цилиндрической формы) целесообразно проводить электронно-лучевой бомбардировкой. Для этого поток электронов в электрическом поле ускоряется до энергии 6-12 кэВ и фокусируется на поверхность материала (рис.2.6). При столкновении большая часть кинетической энергии электронов превращается в тепловую энергию. Реализуемая при этом температура мишени при этом может быть составлять величину свыше 3000°С. Энергия, выделяемая электронами, сконцентрирована в небольшом приповерхностном объеме, определяемом глубиной проникновения электронов в испаряемый материал и площадью зоны фокусировки электронного луча. Нижняя поверхность испаряемого

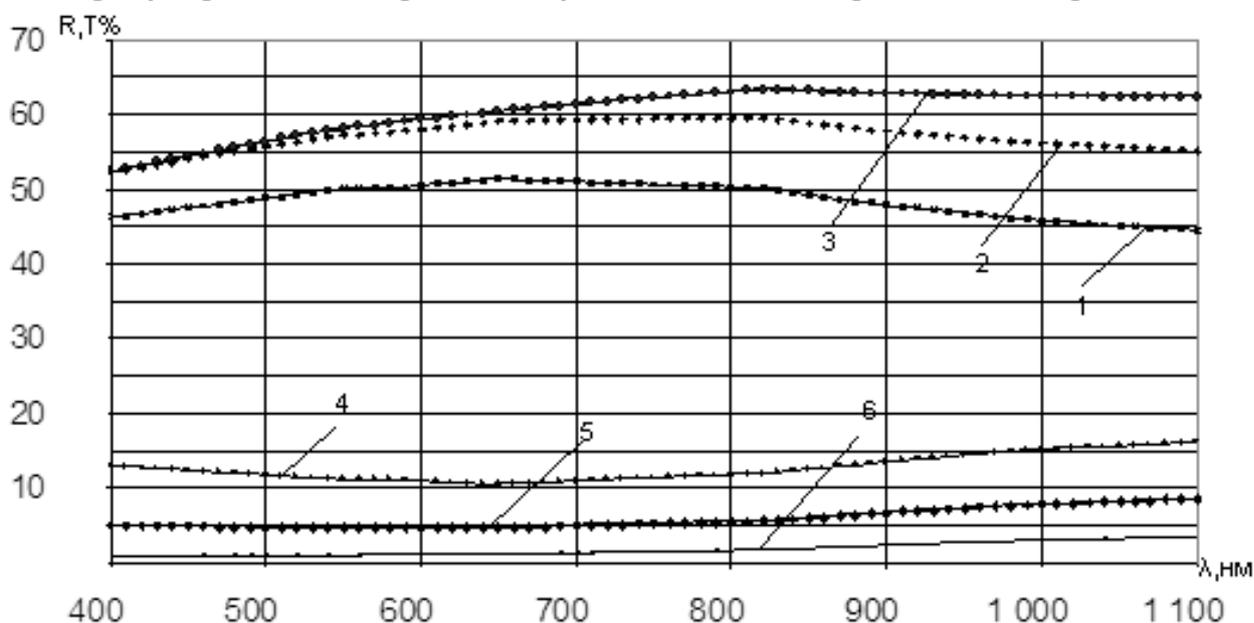


Рис. 2.5. Кривые 1 и 4 - зависимости отражения и пропускания пленки титана толщиной 5 нм, нанесенной на подложку из стекла К8 ($n=1,51$). Кривые 2 и 5 - аналогичные зависимости для слоя титана толщиной 10 и 3 и 6 - для слоя титана толщиной 15 нм соответственно.

материала находится в контакте с поверхностью испарителя, охлаждаемого водой. Следовательно, взаимодействие между испаряемым веществом и материалом испарителя практически отсутствует.

В устройствах, основанных на принципе нагрева электронной бомбардировкой, применяются электронные пушки. В качестве источника электронов обычно используют катод из вольфрамовой проволоки, поскольку этот материал сохраняет форму при высоких температурах, необходимых для получения значительной электронной эмиссии. Электроны, эмитированные из катода, необходимо ускорять до потенциала в несколько кВ. Испарители, в которых ускоряющее поле прикладывается между катодом и испаряемым веществом, называются испарителями с испаряемым анодом. Энергия электронов в пучках достаточна для

ионизации остаточных газов или молекул испаряемого вещества. Эти процессы обуславливают потери энергии электронами пучка и расфокусировку последнего. С целью уменьшения этих эффектов давление в вакуумной камере должно быть ниже $8 \cdot 10^{-3}$ Па. Для осаждения оптических покрытий используются электронные пушки с изгибом траектории электронного луча. Использование искривленных траекторий электронов позволяет эффективно разделить на малом расстоянии электронную пушку и источник паров. На рис. 2.6 схематически изображена электронная пушка с искривленной траекторией луча. Искривление траектории луча осуществляется за счет постоянного магнитного поля, направление напряжённости которого перпендикулярно плоскости, в которой лежит траектория луча, подстройка положения луча на мишени происходит путем изменения тока накала, который определяет скорость эмитированных электронов.

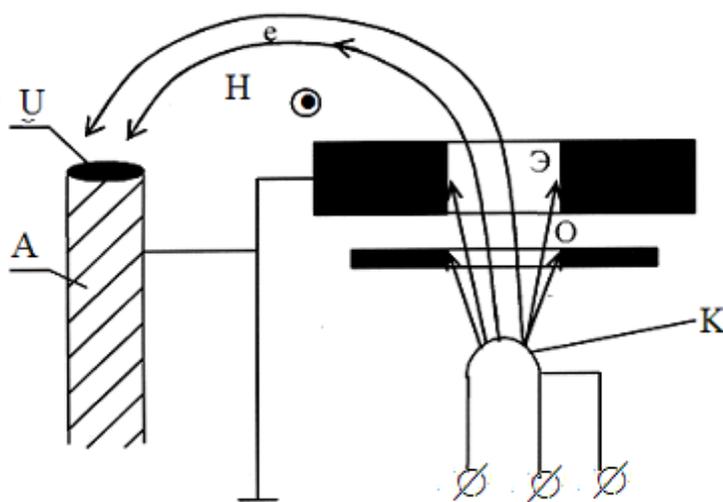


Рис. 2.6. Схема электронно-лучевого испарителя: U – испаряемое вещество; A – анод; K – катод; O – ограничивающая диафрагма; Э – экранирующая диафрагма.

В таких пушках для увеличения тока эмиссии используется относительно большая площадь удлиненного катода. Это позволяет без снижения мощности пушки использовать рабочее напряжение до 12 кВ. Для защиты от ионов испаряемого материала и от разрушения ионной бомбардировкой катод экранирован.

В данной конструкции испарителя испаряемое вещество находится в охлаждаемой водой медной подставке (тигле). В зависимости от тепловых контактов между подставкой и испаряемым веществом, величины подводимой мощности для данных конструкций электронных пушек

температура нагрева вещества может составить 3500°C , что позволяет испарять как тугоплавкие металлы, так и оксиды.

Образовавшиеся на стекле полупрозрачные слои в зависимости от их толщины имеют различную стабильность во времени. На любой, самой химически устойчивой металлической тонкой пленке, всегда образуется оксидный слой. Влияние его на спектральные характеристики пленки тем сильнее, чем тоньше слой металла.

При осаждении металлических слоев следует учитывать, что оксидная пленка, которая возникает при напуске воздуха, содержащего большой процент кислорода, в вакуумную камеру, может привести к увеличению пропускания пленки. Поэтому следует осаждать слои большей толщины и меньшего пропускания, чем те, которые должны быть использованы при эксплуатации. Величина изменения коэффициента пропускания до и после напуска воздуха в вакуумную камеру определяется экспериментальным путем. Исходя из полученных результатов, методом последовательных приближений необходимо скорректировать пропускание образца в камере до получения заданных результатов пропускания образца на воздухе.

Оптические постоянные пленок, полученных термическим испарением титана в вакууме приведены в приложении к данной лабораторной работе.

Содержание работы

1. Провести испарение титана до получения на контрольном образце пропускания равного 0,05. Контроль пропускания необходимо проводить с использованием СФКТ-751. Длина волны излучения, на которой производится пропускание равна 550нм. Перед испарением произвести прогрев испаряемого материала. Прогрев заключается в удалении газов, сорбированных материалом в процессе его хранения на воздухе. Окончание прогрева соответствует давлению остаточных газов в камере $2 \cdot 10^{-3}$ Па. Длительность прогрева зависит от времен хранения образца на воздухе и способа его получения.

2. Произвести измерение пропускания данного образца на спектрофотометре СФ-26, СФ-46 в диапазоне длин волн (380-900) нм.

3. Построить график зависимости $T = f(\lambda)$.

4. Провести испарение титана до получения на контрольном образце пропускания равного 0,2. Контроль пропускания необходимо проводить с использованием СФКТ-751. Длина волны излучения, на которой производится пропускание равна 550нм. Перед испарением произвести прогрев испаряемого материала. Прогрев заключается в удалении газов, сорбированных материалом в процессе его хранения на воздухе. Окончание прогрева соответствует давлению остаточных газов в камере

$2 \cdot 10^{-3}$ Па. Длительность прогрева зависит от времен хранения образца на воздухе и способа его получения.

5. Повторить пункты 2, 3.

6. Провести испарение титана до получения на контрольном образце пропускания равного 0,4. Контроль пропускания необходимо проводить с использованием СФКТ-751. Длина волны излучения, на которой производится пропускание равна 550нм. Перед испарением произвести прогрев испаряемого материала. Прогрев заключается в удалении газов, сорбированных материалом в процессе его хранения на воздухе. Окончание прогрева соответствует давлению остаточных газов в камере $2 \cdot 10^{-3}$ Па. Длительность прогрева зависит от времен хранения образца на воздухе и способа его получения.

7. Повторить пункты 2, 3.

8. Провести испарение титана до получения на контрольном образце пропускания равного 0,1. Контроль пропускания необходимо проводить с использованием СФКТ-751. Длина волны излучения, на которой производится пропускание равна 550нм. Перед испарением произвести прогрев испаряемого материала. Прогрев заключается в удалении газов, сорбированных материалом в процессе его хранения на воздухе. Окончание прогрева соответствует давлению остаточных газов в камере $2 \cdot 10^{-3}$ Па. Длительность прогрева зависит от времен хранения образца на воздухе и способа его получения. Рассчитать скорость осаждения плёнки титана.

9. Повторить пункты 2, 3.

10. Составить краткий технологический процесс изготовления слоёв титана.

11. Записать для каждой плёнки титана с пропусканием 0,05, 0,1, 0,2, 0,4 ток накала катода (J_n), ускоряющее напряжение (U), ток эмиссии катода (J_s), время прогрева испаряемого вещества, время осаждения испаряемого вещества, давление в вакуумной камере до начала осаждения слоя, во время формирования слоя и после окончания осаждения вещества, длину волны (λ_0), на которой производился контроль изменения коэффициента пропускания во время осаждения слоя. изменение отсчетов на СФКТ-751, соответствующее пропусканию контрольного образца непосредственно после нанесения слоя металла, перед закрытием высоковакуумного затвора, после закрытия высоковакуумного затвора, перед напуском воздуха в камеру и после напуска воздуха в камеру.

Методические указания и порядок выполнения работы

Провести осаждение слоя титана, формирующего нейтральный светофильтр согласно методике, изложенной в приложении. Работа выполняется с использованием электронно-лучевого испарителя.

Оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Схему ЭЛИ.
2. Схему СФКТ-751 (в описании вакуумной установки ВУ-1А).
3. Спектральные зависимости всех изготовленных образцов.
4. Длину волны, на которой производился контроль толщины слоя осаждаемого покрытия.
5. Данные о пропускании контрольного образца при различных давлениях окружающей среды.
6. Краткий технологический процесс изготовления нейтральных фильтров.
7. Выводы о проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Что такое нейтральный светофильтр.
2. Основные характеристики нейтральных светофильтров
3. Факторы, влияющие на значения величин n и k .
4. Принцип работы ЭЛИ.
5. Принцип работы СФКТ-751.
6. Где применяются нейтральные фильтры?
7. Какова точность спектрофотометра СФ-26, СФ-46 и чем это обусловлено?
8. Каковы границы прозрачности оптических стекол?
9. Зависимость спектральных кривых поглощающих слоёв от их оптических постоянных при разных значениях показателей преломления и оптических толщин.

Основная литература

1. Путилин Э.С.. Оптические покрытия. СПб. СПб ГУ ИТМО, 2010. 210с.
2. Гайнутдинов И.С., Несмелов Е.А., Михайлов А.В., Иванов В.П., Абзалова Г.И. Свойства и методы получения интерференционных покрытий для оптического приборостроения. Казань. Фэн 2003 423с.
3. Розанов Л.Н. Вакуумная техника <http://lib.memmat.ru/ooks/320024>

Дополнительная литература

1. Кириллова М.М., Чариков Б.А. Оптические свойства титана в области квантовых переходов. Журнал "Физика металлов и металловедение".- 1969-Т.15,вып.2.
2. Абелес Ф. Оптические свойства металлических пленок. Физика тонких пленок. Под ред. М.К. Франкомба и Р.У. Гофмана -М: Мир,1973-Т.6.

3. Холлэнд Л. Нанесение тонких пленок в вакууме. 1963, М. - Госэнергоиздат.
4. Житарюк В.Г., Гуминецкий С.Г. О точности интерференционных методов определения оптических постоянных тонких слоев. Журнал "Оптика и спектроскопия" 1982, т.52, вып.1, с.126-129.
5. Костюк В.П. Одновременное определение оптических постоянных и толщины тонких пленок по результатам спектрофотометрических измерений. Журнал "Прикладная спектроскопия", 1988, т.48, вып.1, с.91-95

Приложение

Оптические постоянные титана [5]

λ , мкм	n	k	λ , мкм	n	k
0,475	1,65	2,90	1,30	3,40	4,05
0,525	1,75	3,10	1,35	3,50	4,05
0,550	1,85	3,15	1,40	3,55	4,20
0,600	2,15	3,10	1,45	3,70	4,25
0,625	2,15	3,20	1,50	3,80	4,35
0,675	2,20	3,40	1,55	3,70	4,50
0,750	2,40	3,50	1,60	3,80	4,45
0,850	2,55	3,70	1,70	3,80	4,50
0,900	2,65	3,80	1,80	4,05	4,60
0,950	2,80	3,80	2,00	4,05	4,85
1,00	2,75	3,85	2,20	4,20	5,00
1,10	3,00	3,80	2,30	4,25	5,00
1,15	3,00	3,90	2,40	4,35	5,30
1,20	3,10	3,90	2,50	4,40	5,25
1,25	3,30	4,00	3,00	4,45	5,85
			3,50	4,55	6,60
			4,00	4,65	7,30

Лабораторная работа № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОСВЕТЛЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ ОСАЖДЕНИЕМ ПЛЕНКООБРАЗУЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ИСПАРЕНИЕМ В ВАКУУМЕ

Цель работы – изготовление просветляющих покрытий методом термического испарения. Исследование отражательной способности покрытий в видимой области спектра. Исследование факторов, влияющих на отклонение спектральной зависимости энергетического коэффициента отражения просветляющего покрытия от расчетной. Составление блок-схемы технологического процесса изготовления просветляющего покрытия.

Теоретическая часть

Просветление поверхностей элементов оптических систем используют по двум причинам. Во-первых, если оптическая система состоит из элементов с высокими показателями преломления или если количество элементов велико, потери света из-за отражения на границах раздела сред с различающимися показателями преломления могут быть недопустимо большими. Во-вторых, в плоскость изображения попадает свет, претерпевший многократное отражение от поверхностей элементов, что приводит к уменьшению контрастности и четкости изображения.

Для увеличения пропускания оптических деталей на их преломляющие поверхности наносятся просветляющие покрытия, которые уменьшают коэффициент отражения преломляющих поверхностей до 0,001 в одной или нескольких длинах волн и до 0,008 в широком спектральном диапазоне.

При получении просветляющих покрытий могут быть использованы различные методы. Это может быть осаждение из растворов плёнкообразующих соединений или термическое испарение материалов в вакууме или иные способы.

В зависимости от конструктивных и эксплуатационных условий работы детали выбирается конструкция просветляющего покрытия (составляющие покрытие материалы, количество, толщины слоев и порядок их следования), а так же способ его изготовления. Наиболее дешевыми и простыми в изготовлении являются однослойные четвертьволновые покрытия, минимальная отражательная способность которых при нормальном падении света определяется выражением:

$$R_{\min} = \left(\frac{n_1^2 - n_0 n_m}{n_1^2 + n_0 n_m} \right)^2 \quad (3.1)$$

n_0 - показатель преломления воздуха,

n_1 - показатель преломления пленки с оптической толщиной $n_1 d_1 = \lambda_0 / 4$,

n_m - показатель преломления подложки.

λ_0 - длина волны, при которой $R = R_{\min}$ и производится контроль осаждения четверть волнового слоя,

Минимальная отражательная способность $R=0$ реализуется при условии, что $n_1 = \sqrt{n_0 n_m}$

Применительно к оптическим материалам, прозрачным в видимой области спектра n_m стекол изменяется от 1.45 до 2.14, показатель преломления n_1 должен иметь величину от 1.20 до 1.46. Пленкообразующих веществ, обладающих достаточной механической прочностью и стабильностью с показателем преломления меньше чем 1.38 нет. Обычно для однослойного просветления применяют пленки фтористого магния (MgF_2 $n_1=1.38$) и оксида кремния (SiO_2 $n_1=1.45$), которые эффективны только для стекол с $n_m > 1.90$. Эти пленки не могут снизить остаточный коэффициент отражения до нуля для остальных оптических материалов.

Уменьшения отражательной способности материалов, прозрачных в видимой, УФ и ближней ИК областях спектра, до величин близких к нулю, достигают применением многослойных просветляющих покрытий.

Наиболее часто используют двухслойные покрытия, состоящие из следующих пар компонентов MgO-MgF_2 , $\text{ZrO}_2\text{-SiO}_2$, $\text{HfO}_2\text{-SiO}_2$ и др. Оптическая толщина слоев этих материалов определяет характер спектральной кривой остаточного коэффициента отражения и зависит от значений показателей преломления слоев и подложки. Значения оптических толщин определяют в зависимости от показателей преломления пленкообразующих материалов и подложки из условия $R=0$, при $\lambda = \lambda_0$, где λ - длина волны, на которой измеряется R или $R \rightarrow 0$ для заданного спектрального интервала ($R \leq 0,008$).

Величина показателей преломления зависит от условий осаждения диэлектриков, т.е. величины остаточного давления в вакуумной камере, состава остаточных газов, изменения стехиометрического состава вещества во время осаждения слоя, скорости испарения, температуры подложки. Отклонения в величинах показателей преломления и оптических толщин слоев вызывает отличия полученной экспериментально и спектральной зависимостями. Поскольку в формировании покрытия участвует не один материал, то количество факторов, влияющих на отклонение спектральной кривой, увеличивается с увеличением числа слоев просветляющего покрытия, поэтому при выборе конструкции просветляющего покрытия желательно обходиться минимальным количеством слоев.

Двухслойные покрытия, состоящие из тугоплавких оксидов (ZrO_2 , HfO_2 , SiO_2 , MgO) изготавливаются способом электронно-лучевого испарения веществ в вакууме. Покрытия, содержащие MgF_2 , могут

изготавливаться также с помощью резистивного испарения. Режимы осаждения (температура подложки, остаточное давление в камере, скорость испарения) определяются технико-эксплуатационными условиями применения детали. Режимы испарения (ток накала, эмиссии, ускоряющее напряжение) для электронно-лучевого испарения и ток накала для резистивного испарения выбираются в зависимости от давления паров пленкообразующего материала и типа испарителя. Давление паров испаряемого вещества должно составлять 10^{-2} мм.рт.ст.

Прежде чем рассматривать конкретные просветляющие диэлектрические системы выведем несколько соотношений, полезных для более подробного анализа. Условие просветления означает равенство нулю энергетического коэффициента отражения, т.е. $R=0$. По определению

$R=|r_0|^2=r_0 \times r_0^*$ отсюда следует, что условие просветления может быть записано в виде $r_0 = 0$. Амплитудный коэффициент отражения непоглощающей системы слоев, выраженный через элементы матрицы интерференции равен согласно [1]:

$$r = \frac{(n_0 m_{11} - n_m m_{22}) + (n_0 n_m m_{12} - m_{21})}{(n_0 m_{11} + n_m m_{22}) + (n_0 n_m m_{12} + m_{21})} \quad (3.2),$$

где m_{11} , m_{12} , m_{21} , m_{22} - элементы матрицы, характеризующие просветляющий слой или систему, состоящей из нескольких слоёв.

Нетрудно показать, что при условии:

$(n_0 m_{11} + n_m m_{22})^2 + (n_0 n_m m_{12} + m_{21})^2 \neq 0$ равенство нулю амплитудного коэффициента отражения будут выполняться, если одновременно равны нулю действительная и мнимая части числителя:

$$\begin{cases} n_0 m_{11} - n_m m_{22} = 0 \\ n_0 n_m m_{12} - m_{21} = 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

Наиболее часто используются двухслойные покрытия, оптические толщины которых не равны друг другу.

Матрица интерференции, описывающая такие покрытия, имеет вид:

$$\begin{vmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos \varphi_1 & i(n_1)^{-1} \sin \varphi_1 \\ i n_1 \sin \varphi_1 & \cos \varphi_1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \cos \varphi_2 & i(n_2)^{-1} \sin \varphi_2 \\ i n_2 \sin \varphi_2 & \cos \varphi_2 \end{vmatrix} \quad (3.4)$$

где n_1 - показатель преломления слоя, граничащего с воздухом,

$\varphi_1 = 2\pi n_1 d_1 (\lambda)^{-1}$ - оптическая толщина слоя, граничащего с воздухом,

n_2 - показатель преломления слоя, прилегающего к подложки,

$\varphi_2 = 2\pi n_2 d_2 (\lambda)^{-1}$ - оптическая толщина слоя, прилегающего к подложке

Значения элементов матрицы интерференции, выраженные через параметры слоев, равны:

$$\begin{aligned}
m_{11} &= \cos\varphi_1 \cos\varphi_2 - n_2 \cdot (n_1)^{-1} \sin\varphi_1 \sin\varphi_2 \\
m_{12} &= (n_2)^{-1} \cos\varphi_1 \sin\varphi_2 + (n_1)^{-1} \sin\varphi_1 \cos\varphi_2 \\
m_{21} &= n_1 \sin\varphi_1 \cos\varphi_2 + n_2 \sin\varphi_2 \cos\varphi_1 \\
m_{22} &= \cos\varphi_1 \cos\varphi_2 - n_1 \cdot (n_2)^{-1} \sin\varphi_1 \sin\varphi_2
\end{aligned} \tag{3.5}$$

Условие просветления, после подстановки (3.5) в (3.3), имеет вид:

$$\begin{cases}
(n_0 - n_m) \cos\varphi_1 \cos\varphi_2 - \left(\frac{n_0 n_2}{n_1} - \frac{n_m n_1}{n_2} \right) \sin\varphi_1 \sin\varphi_2 = 0 \\
\left(\frac{n_0 n_m}{n_2} - n_2 \right) \cos\varphi_1 \sin\varphi_2 + \left(\frac{n_0 n_m}{n_1} - n_1 \right) \sin\varphi_1 \cos\varphi_2 = 0
\end{cases}$$

Если из требований к механической прочности, химической стойкости и влагустойчивости выбраны некоторые пленкообразующие материалы, т.е. известны возможные значения показателей преломления пленкообразующих материалов n_1 и n_2 , то задача определения конструкции просветляющего покрытия сводится к нахождению оптической толщины пленкообразующих слоев. Подставляя в выражение (3.2) известные величины ($n_0, n_m, n_1, n_2, \lambda_0$) и неизвестные величины

$$\varphi_1 = 2\pi n_1 d_1 (\lambda)^{-1} \text{ и } \varphi_2 = 2\pi n_2 d_2 (\lambda)^{-1}$$

найдем оптические толщины слоев $n_1 d_1, n_2 d_2$, определив предварительно φ_1, φ_2 , здесь d_1, d_2 - толщины соответствующих слоев.

Решая систему (3.5) относительно φ_1 и φ_2 , получим:

$$\begin{aligned}
(\operatorname{tg}\varphi_1)^2 &= -n_1 \left(\frac{(n_2^2 - n_0 n_m)}{(-n_1^2 + n_0 n_m)} \frac{(n_m - n_0)}{(n_0 n_2^2 - n_1^2 n_m)} \right) \\
(\operatorname{tg}\varphi_2)^2 &= n_2 \left(\frac{(n_1^2 - n_0 n_m)}{(-n_2^2 + n_0 n_m)} \frac{(n_m - n_0)}{(n_0 n_2^2 - n_1^2 n_m)} \right)
\end{aligned} \tag{3.6}$$

поскольку φ_1 и φ_2 действительные числа, то для решения этой системы необходимо, чтобы правая часть выражений, входящих в (3.6) была бы больше нуля. С учетом того, что $n_m - n_0 > 0$ при падении света из воздуха система имеет решения при выполнении одного из следующих условий:

$$\text{а) } \begin{cases} n_1^2 - n_0 n_m > 0 \\ n_2^2 - n_0 n_m > 0 \\ n_0 n_2^2 - n_1^2 n_m > 0 \end{cases} \quad \text{б) } \begin{cases} n_1^2 - n_0 n_m < 0 \\ n_2^2 - n_0 n_m > 0 \\ n_0 n_2^2 - n_1^2 n_m < 0 \end{cases} \tag{3.7}$$

$$\text{в) } \begin{cases} n_1^2 - n_0 n_m < 0 \\ n_2^2 - n_0 n_m < 0 \\ n_0 n_2^2 - n_1^2 n_m > 0 \end{cases} \quad \text{г) } \begin{cases} n_1^2 - n_0 n_m > 0 \\ n_2^2 - n_0 n_m < 0 \\ n_0 n_2^2 - n_1^2 n_m < 0 \end{cases}$$

Условию просветления будут удовлетворять значения n_1 , n_2 , лежащие в заштрихованных областях диаграммы (рис.3.1), определяемых из неравенств (3.7).

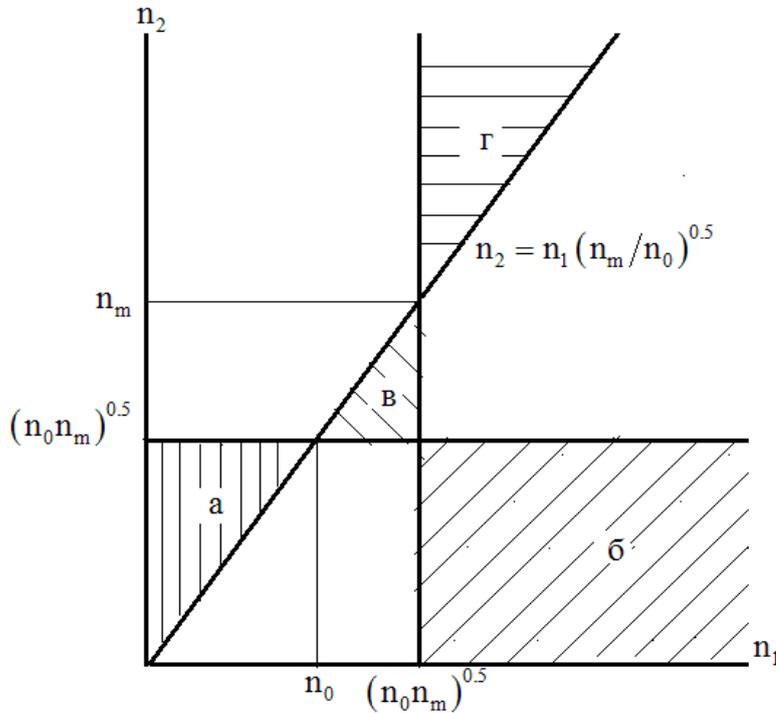


Рис. 3.1. Диаграмма Шустера.

При этом, если φ_1 находится в интервале $(0, 0.5\pi)$, то $0.5\pi < \varphi_2 < \pi$, а если φ_1 находится в интервале $0.5\pi, \pi$, то $0 < \varphi_2 < -0.5\pi$ для двух верхних областей.

$$n_1 d_1 = \frac{1}{2\pi} \arctg \left(\pm n_1 \left[\frac{n_2^2 - n_0 n_m}{n_1 - n_0 n_m} \times \frac{n_m - n_0}{n_0 n_2^2 - n_1 n_m} \right]^{1/2} \right)$$

$$n_1 d_1 = \frac{1}{2\pi} \arctg \left(\mp n_2 \left[\frac{n_1^2 - n_0 n_m}{n_2 - n_0 n_m} \times \frac{n_m - n_0}{n_0 n_2^2 - n_1 n_m} \right]^{1/2} \right)$$

Контроль толщины слоев при изготовлении их методом термического испарения в вакууме целесообразно осуществлять фотометрическим способом, который основан на обработке прошедшего через плоскопараллельную пластину или отраженного от нее светового потока. Величина регистрируемого светового потока является функцией оптических толщин формируемых слоев. При этом, о толщине пленки

судят по известной зависимости коэффициента пропускания T (отражения - R) от оптической толщины:

$$T = \frac{A}{B + C \cos 2\varphi} \quad (3.8)$$

где: $\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_{\phi}} nd$ - фазовая толщина пленки; d и n - геометрическая

толщина и показатель преломления формируемой пленки; λ_{ϕ} - длина волны фотометрирования; A , B и C - коэффициенты, зависящие от показателей преломления подложки, обрамляющей среды, предварительно осажденных слоев и их толщин. Здесь рассматривается формирование слоёв из непоглощающего материала. При фотометрическом методе контроль чаще всего осуществляют по достижению экстремума пропускания (отражения), который наступает, когда фазовая толщина формируемого слоя равна или кратна $0.25\lambda_{\phi}$.

Экстремальным значениям пропускания (отражения) соответствует толщина пленки (nd) кратная значениям $\lambda_0/4$, где λ_0 - длина волны излучения на выходе монохроматора, n - коэффициент преломления наносимого вещества. В качестве плёнообразующих материалов в данной работе используются оксид и фторид магния, оксиды циркония и кремния, имеющие показатели преломления: 1.70; 1.38; 1.95 и 1,45 соответственно.

Дифференцируя величину отражённого изменяющегося светового потока по времени можно получить информацию о скорости формирования пленки на поверхности подложки.

Содержание работы

1. Определить толщину слоёв и порядок расположения двухкомпонентных просветляющих систем, образованных слоями оксида магния ($n=1.70$) и фторида магния ($n=1.38$), оксидов циркония ($n=1.95$) и кремния ($n=1.45$).

2. Выбрать системы, обеспечивающие минимальный энергетический коэффициент отражения на длине волны $\lambda_0=550\text{нм}$, из перечисленных выше плёнообразующих материалов.

3. Изготовить выбранные (две) диэлектрические системы, измерить её спектральную характеристику и сравнить её с расчетными спектральными кривыми просветляющего покрытия на основе MgO ($n=1.70$), MgF_2 ($n=1.38$), (или ZrO_2 ($n=1.95$) и SiO_2 ($n=1.45$)), для чего следует:

3.1. Произвести осаждение оксида магния с рассчитанной в п.1 оптической толщиной. Контроль толщины слоя проводить на длине волны λ_{k2} , соответствующей условию: $n_2 d_2 = 0.25 \lambda_{k2}$, где $n_2 d_2$ - рассчитанная в пункте 1 оптическая толщина первого слоя.

3.2. Нагреть подложку до температуры 250°C и выдержать ее при этой температуре 20 минут.

3.3. Произвести осаждение фторида магния с рассчитанной в п.1 оптической толщиной. Контроль толщины слоя проводить на длине волны $\lambda_{к1}$, в которой энергетический коэффициент отражения обращается в нуль.

3.4. Измерить спектральную кривую отражения полученного покрытия на рефлексометре. Рефлексометр предназначен для измерения относительной отражательной способности оптических материалов. Он состоит (см. рис.3.2) из сменного источника света /лампа накаливания, водородная лампа/-1, коллимирующей линзы 2, прерывателя 3, зеркала 4, светоделителя 5, держателя 6, исследуемых образцов 7, фокусирующей линзы 8, монохроматора /МДР/ 9, сменных фотоумножителей 10, системы регистрации 11. Оптическая схема МДР - 3 показана на рис.1.3 Свет от источника 1 через конденсор 2 попадает на входную щель 3. Поворотное зеркало 4 и зеркальный параболический объектив 5, в фокальной плоскости которого расположена входная щель, направляет параллельный пучок лучей на дифракционную решётку 6. После дифракционной решётки пучок лучей зеркальным параболическим объективом 7 и поворотным зеркалом 8 направляется на выходную щель 9.

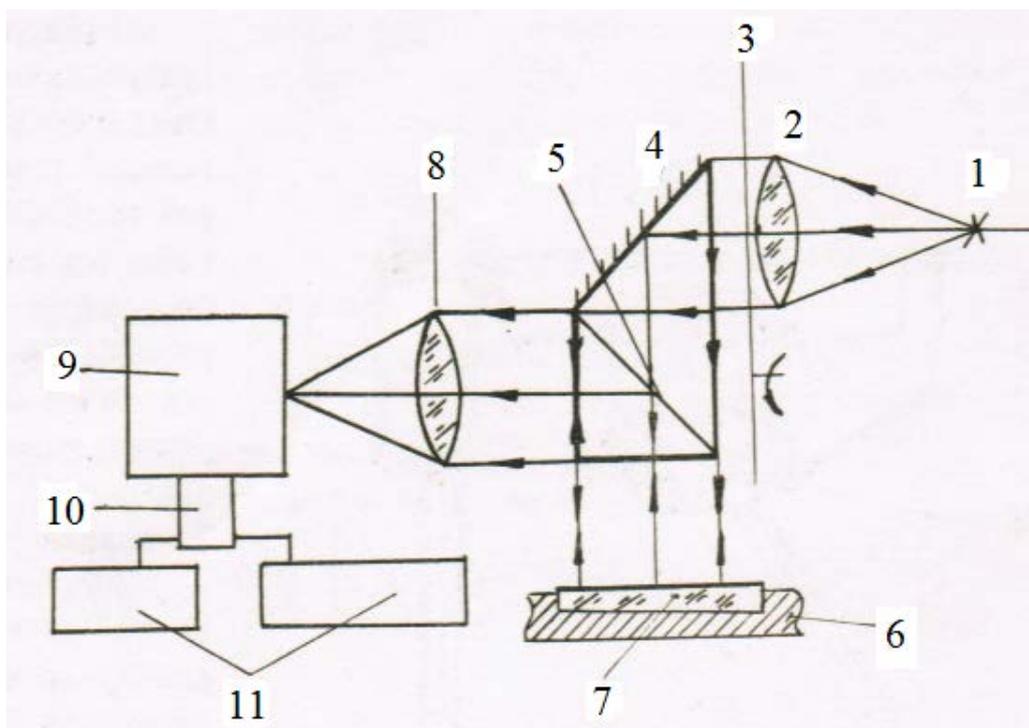


Рис. 3.2 Схема рефлексометра. 1 - сменный источник света /лампа накаливания, водородная лампа/, 2 - коллимирующей линза, 3 - прерыватель, 4 - зеркало, 5 - светоделитель, 6- держатель, 7 - исследуемый образец, 8 - фокусирующая линза, 9 - монохроматора /МДР/, 10 - сменных фотоумножителей, 11 - системы регистрации.

Рабочий диапазон спектра обеспечивается тремя дифракционными решётками /репликами/, работающими в трёх областях спектра: от 300 до 600 нм, от 400 до 1200 нм, от 380 до 2500 нм.

Прибор предназначен для работы со спектром 1-го порядка. Спектры высших порядков отсекаются светофильтрами 10.

Оси входной и выходной щелей монохроматора расположены по одной прямой. Щели монохроматора симметричны, с переменной шириной раскрытия. Ширина входной и выходной щелей определяется по шкалам /цена деления 0.01мм/.

3.5. Повторить п.п. 3.1,3.2,3.3,3.4.

3.6. Произвести сравнение полученных результатов, проанализировать причины, вызвавшие расхождения в спектральных кривых.

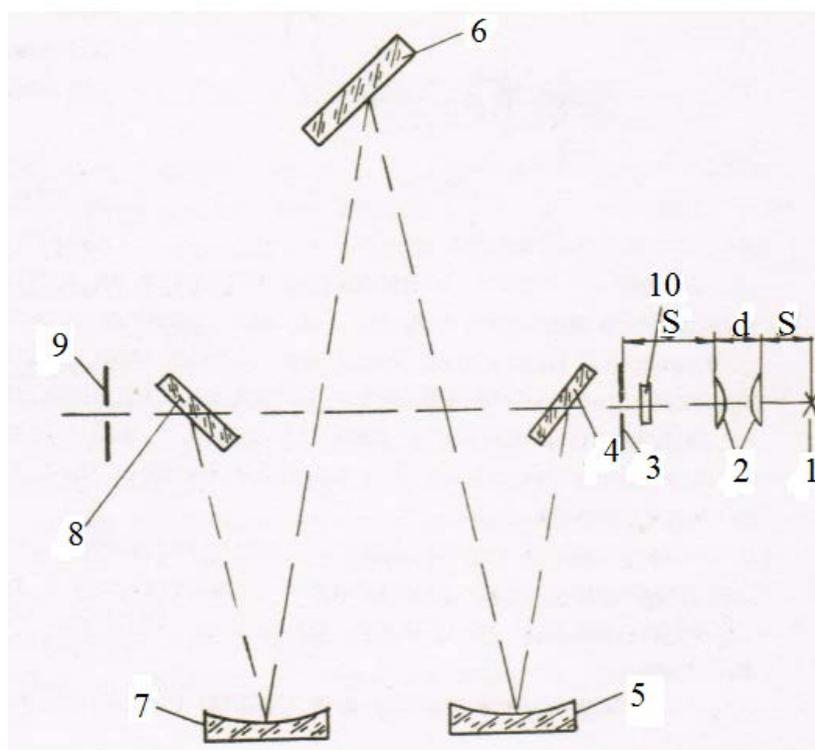


Рис. 3.3 Оптическая схема МДР. 1- источника, 2 – конденсор, 3 - входная щель, 4- поворотное зеркало, 5- зеркальный параболический объектив, 6- дифракционная решётка, 7 - зеркальный параболический объектив, 8- поворотное зеркало, 9- выходная щель.

3.7. Во время осаждения слоев оксида магния и фторида магния, оксидов циркония и кремния записывать давление паров остаточных газов в начале и в конце осаждения слоёв, величину токов накала и эмиссии катода, величину ускоряющего напряжения и время осаждения слоя. Значения фотометрических сигналов, соответствующих

пропусканию контрольного образца в момент начала и окончания формирования слоёв, изменение отсчетов на СФКТ-751, время осаждения.

Методические указания и порядок выполнения работы

Произвести осаждение слоев, формирующих просветляющие покрытия согласно методике, изложенной в приложении. Работа выполняется с использованием электронно-лучевого и резистивного испарителей.

Оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Схему СФКТ-751.
2. Схему рефлексометра
3. Спектральные кривые всех изготовленных образцов просветляющих покрытий.
4. Конструкции покрытий.
5. Длины волн, на которых производился контроль толщин слоев изготавливаемых покрытия.
6. Выводы о проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Методы получения просветляющих покрытий, достоинства и недостатки.
2. Факторы, влияющие на величину показателя преломления диэлектрических пленок.
3. Принцип работы ЭЛИ.
4. Принцип работы и схема рефлексометра.
5. Назначение просветляющих покрытий.
6. Как зависит коэффициент отражения просветляющего покрытий от показателей преломления плёнообразующих материалов и подложки.
7. Определить оптическую толщину слоя, обеспечивающую минимальное (нулевое) отражение при заданной длине волны отражённого излучения.
8. Отличия структур просветляющих покрытий для видимой и ИК областей спектра.
9. Принцип выбора показателей преломления плёнообразующих материалов для двухслойной системы по диаграмме Шустера.
10. Схема изменения отражения при формировании двухслойных и трёхслойных просветляющих систем.
11. Схема расчёта оптических толщин слоёв двухслойных просветляющих покрытий при использовании выбранных на основе

диаграммы Шустера показателей преломления плёнообразующих материалов.

Спектральные характеристики некоторых широко распространённых видов просветляющих покрытий

На рис. 3.4 представлены расчётные спектральные зависимости энергетического коэффициента отражения четвертьволнового слоя фторида магния с показателем преломления 1,38 ($\lambda_0 = 600$ нм), нанесённого на оптические элементы, образованные материалами с различными показателями преломления. Как видно из рисунка, по мере увеличения показателя преломления материала подложки, минимальное значение коэффициента отражения падает. После того как показатель преломления подложки становится больше чем $(n_m)^{0.5}$ минимальное значение коэффициента отражения начинает расти. На рис.3.5 приведены спектральные зависимости коэффициента отражения для материалов, у которых четвертьволновый слой MgF_2 обеспечивает коэффициент отражения близкий к нулю. Это материал, у которого показатель преломления равен 1.9044 (кривая 1), при незначительном отклонении показателя преломления (1.944) (кривая 2) коэффициент отражения отличается от нуля. На рис. 3.5а приведены вышеописанные зависимости в увеличенном масштабе. На рис.3.6 представлены спектральные зависимости покрытий состоящих из четвертьволновых слоёв оксида циркония и оксида кремния (ZrO_2-SiO_2) (кривая 1) и оксида алюминия и фтористого магния ($Al_2O_3 - MgF_2$) (кривая 2). Толщины вышеперечисленных покрытий кратны $\lambda_0 / 4$ для $\lambda=600$ нм, покрытия нанесены на материал с показателем преломления с 1,52 (стекло К-8). Как видно из графиков отражение близкое к нулю достигается лишь во втором случае, в первом случае наблюдается снижение коэффициента отражения в некоторой области спектра. На рис.3.7 приведена конструкция покрытия состоящего из слоёв оксида циркония и оксида кремния (ZrO_2-SiO_2), толщины которых не равны $\lambda_0 / 4$, сформированного на материале с показателем преломления 1,52. Это покрытие представляет значительный практический интерес, поскольку обеспечивает коэффициент отражения меньше 0,5% в спектральном интервале около 100 нм, а поскольку оно изготавливается из тугоплавких окислов, то обладает высокими эксплуатационными характеристиками (механической прочностью, лучевой стойкостью и т.п.)

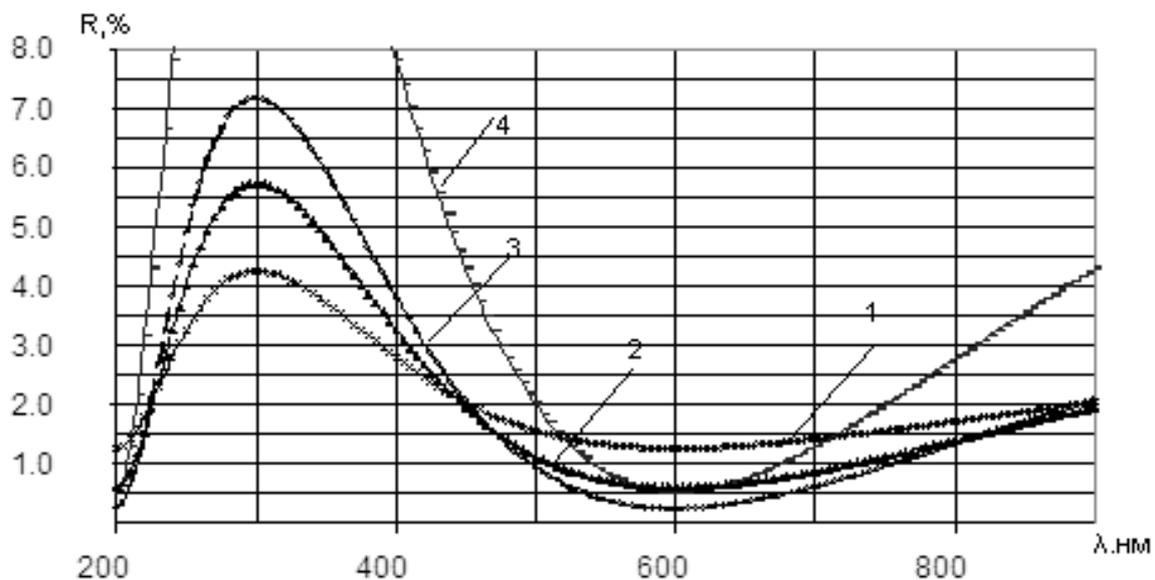


Рис. 3.4 Расчётные спектральные зависимости коэффициента отражения четвертьволнового слоя фторида магния ($\lambda_0 = 600$ нм), нанесённого на материалы с различными показателями преломления: кривая 1- показатель преломления подложки 1.52, преломления: кривая 2- показатель преломления подложки 1.63, преломления: кривая 3- показатель преломления подложки 1.73 и преломления: кривая 4- показатель преломления подложки 2.20.

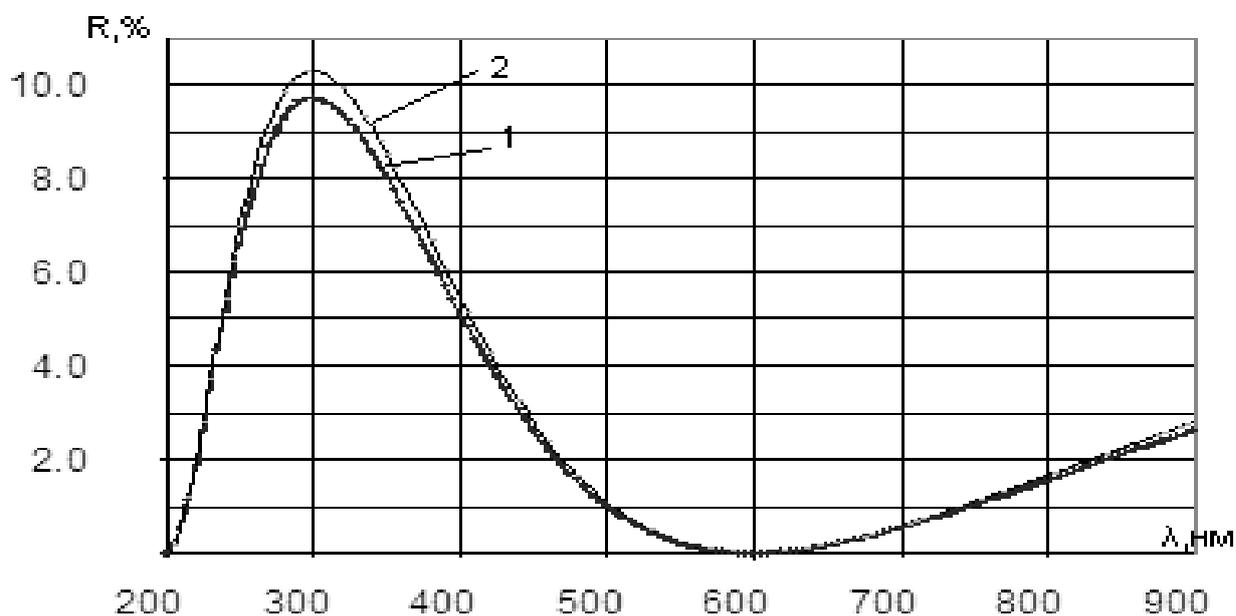


Рис. 3.5 Спектральные зависимости распределения коэффициента отражения четвертьволнового слоя фторида магния ($\lambda_0 = 600$ нм). Нанесённого на материалы с различными показателями преломления: кривая 1- показатель преломления подложки 1.9044, преломления: кривая 2- показатель преломления подложки 1.944.

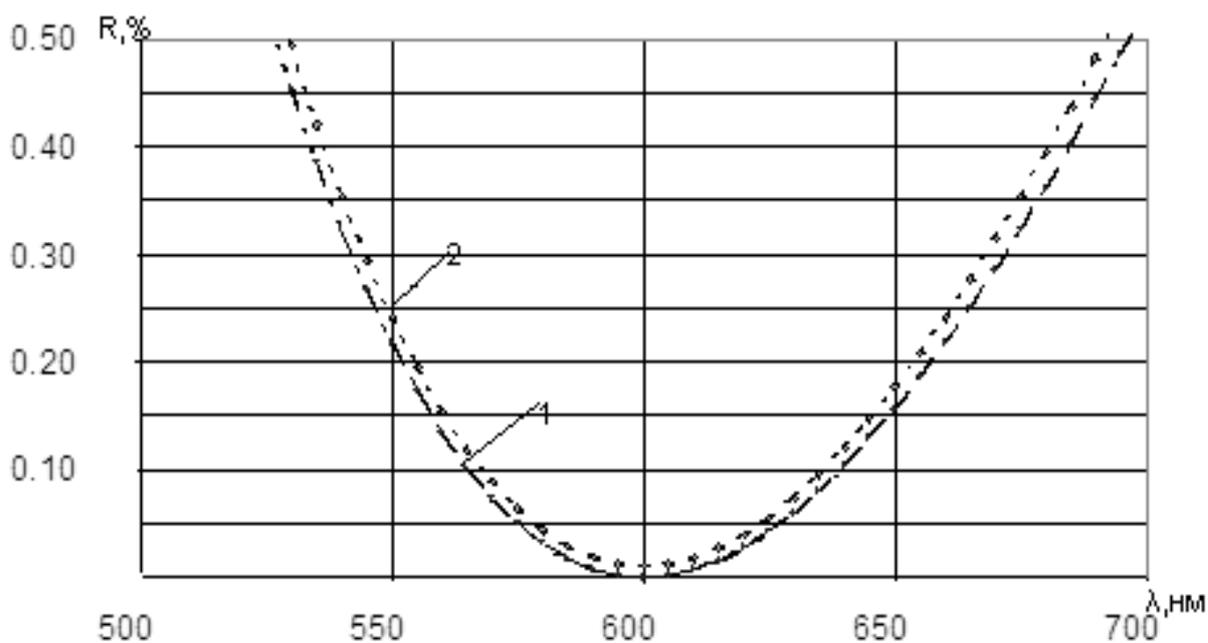


Рис. 3.5а Спектральные зависимости распределения коэффициента отражения четвертьволнового слоя фторида магния ($\lambda_0 = 600$ нм). Нанесённого на материалы с различными показателями преломления: кривая 1- показатель преломления подложки 1.9044, преломления: кривая 2- показатель преломления подложки 1.944.

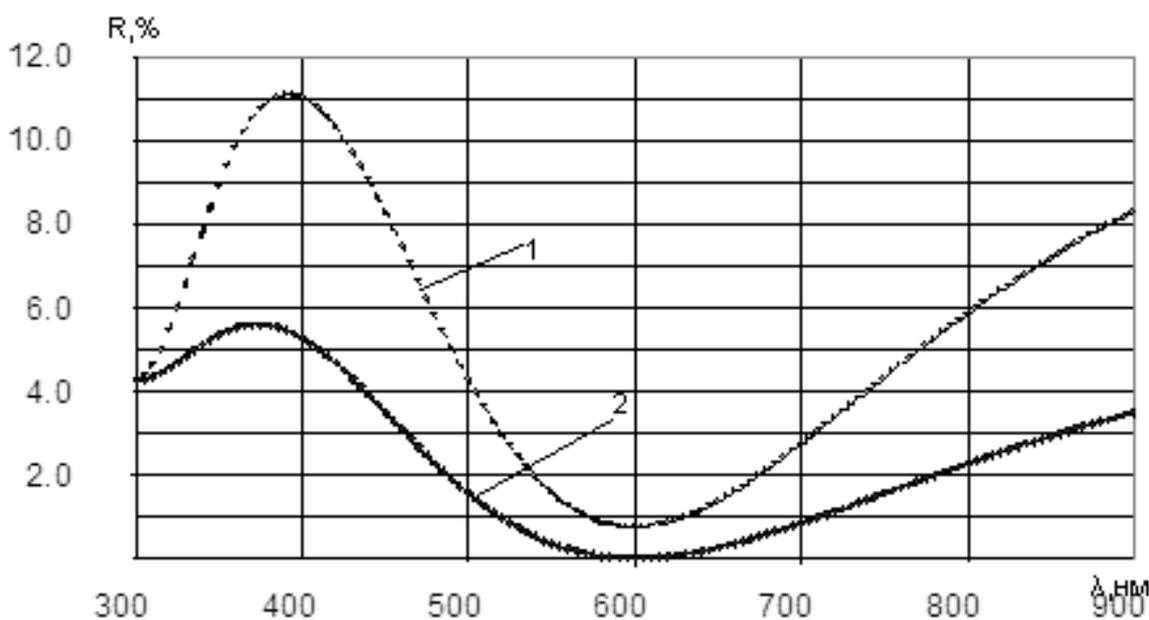


Рис. 3.6 Спектральная зависимость коэффициента отражения покрытия, состоящего из четвертьволновых слоев оксида циркония и оксида кремния ($\lambda_0 = 600$ нм) – кривая 1 и оксида алюминия и фтористого магния ($\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgF}_2$) (кривая 2) сформированных на материале с показателем преломления 1.52

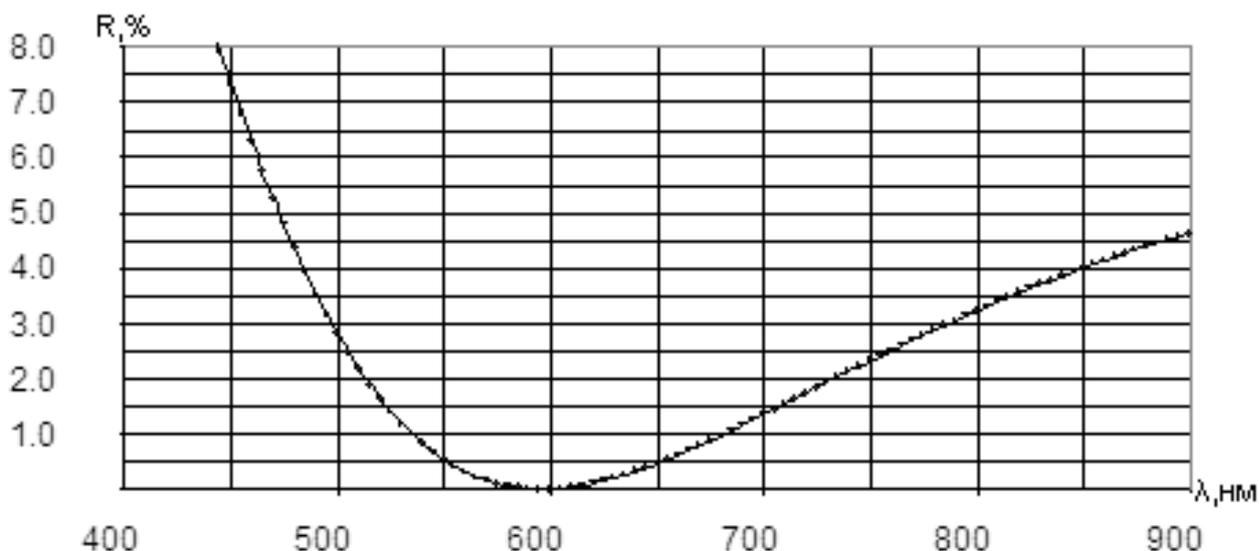


Рис. 3.7 Спектральная зависимость коэффициента отражения покрытия, состоящего из четвертьволновых слоев оксида циркония и оксида кремния, толщины которых не кратны $\lambda_0 / 4$ [3], нанесённые на материал с показателем преломления 1.52.

Основная литература

1. Путилин Э.С. Оптические покрытия 2010 г., СПб ГУИТМО 220с.
2. Гайнутдинов И.С., Несмелов Е.А., Михайлов А.В., Иванов В.П., Абзалова Г.И. Свойства и методы получения интерференционных покрытий для оптического приборостроения. Казань. Фэн 2003г. 423с.

Дополнительная литература

1. Шрейдер Х. Осаждение окисных слоев из органических растворов. Физика тонких пленок. под ред. Г.Хасса и Р. Туна М.:Мир. 1970.
2. Фурман Ш.А. Тонкослойные оптические покрытия. 1977,- Л.:Машиностроение. С.264.

Лабораторная работа № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ

Цель работы – исследование процесса формирования металлодиэлектрических покрытий при изготовлении их испарением в вакууме, определение факторов, влияющих на спектральные характеристики. Измерение спектральной зависимости отражения металлодиэлектрических зеркал. Сравнение спектральных зависимостей отражения металлических зеркал различной конструкции. Составление краткого технологического процесса изготовления металлодиэлектрических зеркал.

Теоретическая часть

Широкополосные высокоотражающие зеркала представляют большой интерес для оптического приборостроения.

Комбинируя металлические и диэлектрические тонкие пленки, удается создать зеркала, которые имеют ряд преимуществ по сравнению с диэлектрическими покрытиями того же класса. Достоинство металлодиэлектрических интерференционных покрытий особенно проявляется при работе системы в широкой области спектра, т.к. в этом случае задача решается при значительно меньшем числе слоев, чем в диэлектрическом исполнении.

Металлодиэлектрические зеркала чаще всего изготавливаются из алюминия (Al), серебра (Ag), реже из золота (Au), платины (Pt), родия (Rh), меди (Cu). Основными требованиями, предъявляемыми к металлу, формирующему зеркало, являются высокий коэффициент отражения в рассматриваемом спектральном диапазоне (Ag) для видимой области спектра, максимальная стойкость к воздействию окружающей среды (Au, Pt, Al), высокая механическая прочность, дешевизна испаряемого материала. Осаждение всех металлов при изготовлении зеркал осуществляется способом термического испарения в вакууме. При осаждении в вакууме коэффициент полезного использования материала редко превышает (5-7)%. При осаждении металлов чаще всего используются проволочные нагреватели. Коэффициент отражения непрозрачного металлического слоя определяется значениями показателя преломления $n_{\text{ме}}$ и коэффициента поглощения $k_{\text{ме}}$ металла. Скорость испарения металлов, а также остаточное давление в камере сказываются на величине их показателей преломления и коэффициентов поглощения, которые определяет значения коэффициента отражения металлического слоя.

Амплитудные коэффициенты отражения и пропускания металлического слоя при нормальном падении излучения с плоским волновым фронтом имеют вид:

$$\begin{cases} r = \frac{n_0 m_{11} - n_m m_{11} + i n_0 n_m m_{12} - i m_{21}}{n_0 m_{11} + n_m m_{11} + i n_0 n_m m_{12} + i m_{21}}, \\ t = \frac{2n_0}{n_0 m_{11} + n_m m_{11} + i n_0 n_m m_{12} + i m_{21}}. \end{cases}$$

где:

$$m_{11} = m_{22} = \cos \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \operatorname{ch} \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \cdot \frac{k_1}{n_1} + i \sin \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \operatorname{sh} \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \cdot \frac{k_1}{n_1},$$

$$m_{12} =$$

$$= \frac{i}{n_1^2 + k_1^2} \left[\begin{array}{l} \left(n_1 \sin \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \operatorname{ch} \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \cdot \frac{k_1}{n_1} + k_1 \cos \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \operatorname{sh} \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \cdot \frac{k_1}{n_1} \right) - \\ -i \left(n_1 \cos \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \operatorname{sh} \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \cdot \frac{k_1}{n_1} - k_1 \sin \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \operatorname{ch} \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \cdot \frac{k_1}{n_1} \right) \end{array} \right],$$

$$m_{21} = n_1 \sin \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \operatorname{ch} \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \cdot \frac{k_1}{n_1} - k_1 \cos \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \operatorname{sh} \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \cdot \frac{k_1}{n_1} - i \left(n_1 \cos \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \operatorname{sh} \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \cdot \frac{k_1}{n_1} + k_1 \sin \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \operatorname{ch} \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \cdot \frac{k_1}{n_1} \right), \quad (4.1)$$

где n_1, k_1, d_1 – показатель преломления, коэффициент поглощения и геометрическая толщина слоя металла, λ – длина волны падающего излучения.

Часто, для защиты металлического слоя или для повышения коэффициента отражения в некоторой области спектра на металлический слой наносится один или несколько диэлектрических слоёв. В этом случае коэффициент отражения системы будет зависеть от параметров всех слоёв, составляющих данное покрытие.

При нанесении нескольких диэлектрических слоёв на тонкий слой металла, расположенного на прозрачной подложке, энергетический коэффициент отражения определяется следующим образом:

$$R = \left| \frac{(n_0 m_{11}^* - n_m m_{22}^*) + i(n_0 n_m m_{12}^* - m_{21}^*)}{(n_0 m_{11}^* - n_m m_{22}^*) + i(n_0 n_m m_{12}^* + m_{21}^*)} \right|^2$$

Где $m_{ji}^*, j, i = 1, 2$ – элементы матрицы интерференции определяются после перемножения матриц, характеризующих каждый слой, в том числе слой металла.

$$M^* = \prod_{i=1}^p \begin{vmatrix} \cos \varphi_i & \frac{i}{n_i} \sin \varphi_i \\ in_i \sin \varphi_i & \cos \varphi_i \end{vmatrix}$$

n_i и φ_i – показатель преломления и фазовая толщина любого слоя, формирующего данную систему, p – количество слоёв металлодиэлектрической системы, включая слой металла.

Если на прозрачной подложке расположен толстый непрозрачный слой металла, а на нём система слоёв диэлектриков, то энергетический коэффициент отражения будет иметь вид:

$$R = \left| \frac{(n_0 m_{11} - n_M m_{22} + n_0 k_M m_{12}) + i(n_0 n_M m_{12} - m_{21} + k_M m_{22})}{(n_0 m_{11} + n_M m_{22} + n_0 k_M m_{12}) + i(n_0 n_M m_{12} + m_{21} - k_M m_{22})} \right|^2,$$

где m_{11} , m_{12} , m_{21} , m_{22} – элементы матрицы, которая характеризует диэлектрическую систему, расположенную на непрозрачном слое металла, n_M , k_M – показатель преломления и коэффициент поглощения металлического слоя, а m_{11} , m_{21} , m_{12} , m_{22} элементы матрицы интерференции, сформированной прозрачными слоями диэлектриков.

В таблице 4.1 представлены оптические постоянные металлов, наиболее часто используемых для формирования зеркальных систем.

Таблица 4.1

Оптические постоянные плёнок алюминия, серебра, золота и меди.

Металл	$\lambda, \text{нм}$	n	k	$R, \%$
1	2	3	4	5
Алюминий	220	0.14	2.35	91.8
	260	0.19	2.85	92.0
	300	0.25	3,33	92,1
	340	0,31	3,80	92,3
	380	0,37	4,25	92,6
	436	0,47	4,84	92,7
	492	0,64	5,50	92,2
	546	0,82	5,99	91,6
	650	1,30	7,11	90,7
	700	1,55	7,00	88,8
	800	1,99	7,05	86,4
	950	1,75	8,50	91,2
	2000	2,30	16,5	96,8
	4000	5,97	30,3	97,5
	6000	11	42,4	97,7
8000	17,0	55,0	98,9	
10000	25,4	67,3	98,0	
Серебро	400	0,075	1,93	93,9
	500	0,050	2,87	97,9

1	600	0,060	3,75	98,4
	700	0,075	4,62	98,7
	800	0,090	5,45	98,8
	950	0,110	6,56	98,9
	2	3	4	5
	2000	0,46	14,4	99,1
	4000	1,89	28,7	99,1
	6000	4,15	42,6	99,1
	8000	7,14	56,1	99,1
	10000	10,69	69,0	99,1
	12000	14,50	81,4	99,2
	Золото	450	1,40	1,88
500		0,84	1,84	50,4
550		0,33	2,32	81,5
600		0,20	2,90	91,9
700		0,13	3,84	96,7
800		0,15	4,65	97,4
900		0,17	5,34	97,8
1000		0,18	6,04	98,1
2000		0,54	11,20	98,3
4000		1,40	22,2	98,8
6000		3,01	33,0	98,9
8000		5,05	43,5	99,0
10000		7,41	53,4	99,0
1100		8,71	58,2	99,0
Медь	450	0,87	2,20	85,2
	500	0,88	2,42	62,4
	550	0,76	2,46	66,9
	600	0,169	2,98	92,8
	800	0,17	4,84	97,3
	1000	0,20	6,27	98,1
	3000	1,22	17,1	98,4
	7000	2,25	40,7	98,8
	10250	11,0	60,6	98,8
	Родий	564	1.62.	4.63

Как видно из приведённой выше таблицы показатели преломления и коэффициенты поглощения металлов обладают дисперсией, хотя энергетический коэффициент отражения от длины волны зависит незначительно.

Диэлектрические пленки, наносимые на металлический слой, при изготовлении металлодиэлектрических зеркал, не только изменяют коэффициент отражения, но и служат для защиты металлического слоя.

Для повышения механической и коррозионной стойкости металлодиэлектрических зеркал и достижения высокого отражения в широкой области спектра целесообразно наносить диэлектрические слои методом электронно-лучевого испарения, используя в качестве материала с низким показателем преломления двуокись кремния (SiO_2), а для осаждения пленок с высоким показателем преломления - тугоплавкие оксиды с $n > 2,3$ (например, двуокись титана - рутил).

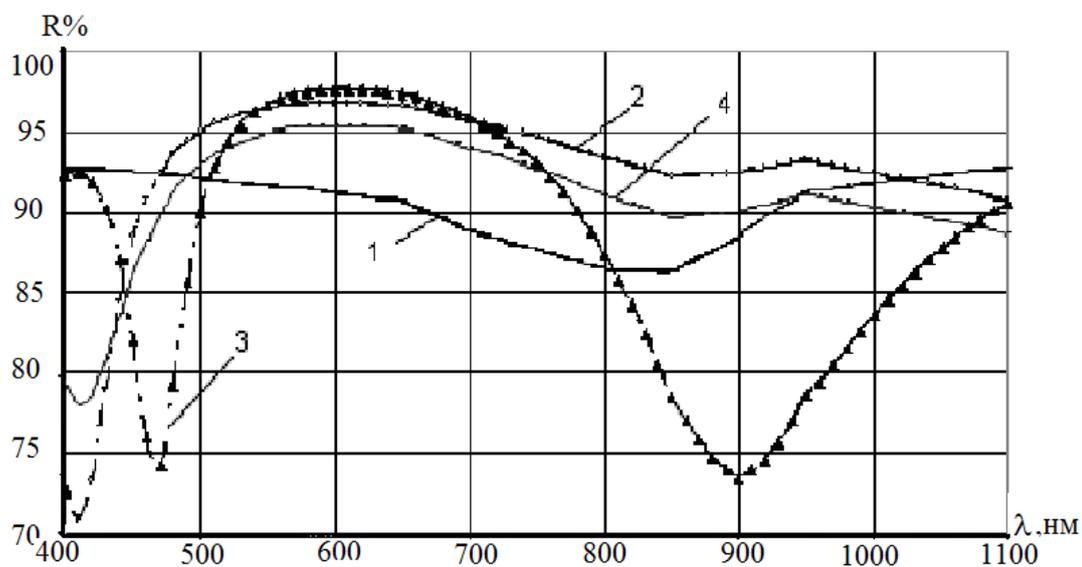


Рис. 4.1 Спектральные зависимости коэффициента отражения зеркал, имеющих разную структуру. Кривая 1 - зеркало, образованное слоем алюминия, оптическая толщина которого составляет 10,5 нм характеризуется. Кривая 2 - металл-диэлектрическое зеркало, состоящее из слоя алюминия, оптическая толщина которого составляет 100 нм с нанесенными на него четвертьволновыми слоями оксида кремния и циркония $\lambda_0=600$ нм, кривая 3 - зеркало $\text{Al-SiO}_2\text{-ZrO}_2\text{-SiO}_2\text{-ZrO}_2$, где символы SiO_2 и ZrO_2 обозначают четвертьволновые слои оксида кремния и циркония ($\lambda_0=600$ нм). Кривая 4 - зеркало $\text{Al-MgF}_2\text{-ZnS}$, где символами: Al – обозначен слой алюминия толщиной 10,5 нм, а MgF_2 и ZnS - четвертьволновые слои фторида магния и сернистого цинка $\lambda_0=600$ нм.

При нанесении тонких слоев диэлектриков с чередующимися (высоким и низким) показателями преломления на металл увеличивается коэффициент отражения зеркал в заданном спектральном диапазоне 2 - 6 процентов в зависимости от конструкции нанесенного диэлектрического покрытия. Возможно также использование в качестве диэлектриков слоев фтористого магния и сернистого цинка. Последние имеют ряд недостатков: их механическая прочность значительно ниже, чем у оксидов, нанесение сернистого цинка недопустимо на серебро, поскольку возможно

потускнение серебра из-за его взаимодействия с серой, образующейся на поверхности металла из-за диссоциации паров сульфида цинка.

Металлодиэлектрические зеркала с использованием слоев фтористых и сернистых соединений, щелочных и щелочноземельных металлов нашли широкое применение в приборах, используемых в лабораторных условиях.

В процессе изготовления металлодиэлектрического высокоотражающего зеркала контроль толщины слоев может производиться как по отражению, так и по пропусканию. При контроле по отражению измеряют величину потока, отраженного от покрытия и прерывают нанесение каждого диэлектрического слоя при достижении первого экстремального значения коэффициента отражения, при этом оптическая толщина осаждаемого слоя меньше, чем $0,25\lambda_0$, где λ_0 - длина волны падающего излучения. Недостаток такого метода заключается в относительно малом изменении коэффициента отражения в процессе нанесения слоев с показателем преломления $n < 1,4$, что приводит к большим ошибкам в оптических толщинах слоев. При контроле по пропусканию, слой металла обладает минимальной прозрачностью. Как правило, коэффициент пропускания на длине волны, на которой производится контроль толщине осаждаемых далее слоёв, не превышает 0,5%. Коэффициентом пропускания металла равен 0,3-0,5%.

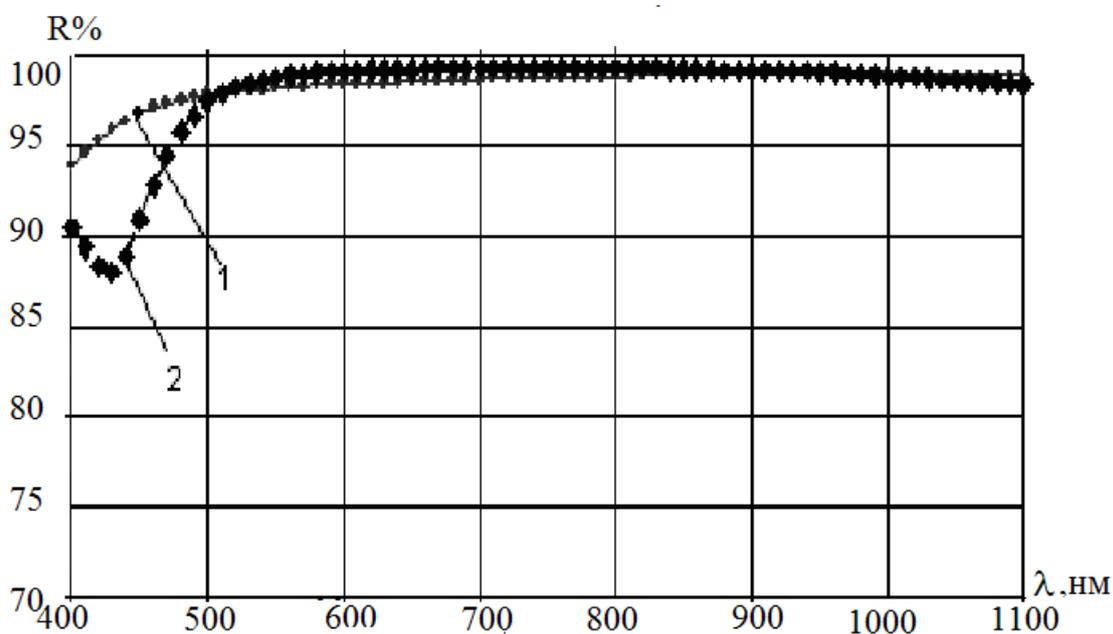


Рис. 4.2. Спектральные зависимости коэффициента отражения слоя серебра, толщина которого 17,5 нм (кривая 1) и зеркала, состоящего из слоя серебра толщиной 17,5 нм, с нанесенными на него четвертьволновыми слоями оксида кремния и циркония (кривая 2) ($\lambda_0=600$ нм).

Контроль оптических толщин диэлектрических слоев осуществляют по фиксации экстремумов при последовательном нанесении тех или иных слоёв диэлектрических материалов, обеспечивающих спектральные характеристики, определённые техническим заданием. Относительное изменение сигнала при контроле по пропусканию в процессе осаждения каждого слоя становится больше, чем при контроле по отражению. Это увеличивает точность контроля.

Содержание работы

1. Определить толщину плёнки, при которой пропускание составляет меньше 0,4 % для одной длины волны, пользуясь значениями показателей преломления и коэффициента поглощения металлов, приведёнными в таблице 4.1
2. Рассчитать спектральную зависимость коэффициента отражения алюминия, пользуясь значениями показателей преломления и коэффициента поглощения металлов, приведёнными в таблице 4.1
3. Произвести испарение алюминия до пропускания контрольного образца 0,004 на длине волны $\lambda = \lambda_0$.
4. Произвести осаждение фтористого магния до первого экстремума пропускания на этой длине волны.
5. Произвести осаждение сернистого цинка до первого экстремума пропускания на той же длине волны.
6. Измерить спектральную кривую отражения полученного зеркала в спектральном диапазоне от $0,75\lambda_0$ до $1,25\lambda_0$.
7. Произвести испарение алюминия до пропускания контрольного образца 0,004 на той же длине волны, что и в предыдущем случае.
8. Произвести осаждение оксида кремния до первого экстремума пропускания.
9. Измерить спектральную кривую отражения полученного зеркала в спектральном диапазоне от $0,75\lambda_0$ до $1,25\lambda_0$.
10. Произвести испарение алюминия до пропускания контрольного образца 0,004.
11. Произвести осаждение оксида кремния до первого экстремума пропускания.
12. Произвести осаждение оксида циркония до первого экстремума пропускания.
13. Измерить спектральную кривую отражения полученного зеркала.
14. Произвести испарение алюминия до пропускания контрольного образца 0,004.
15. Произвести осаждение оксида кремния до первого экстремума пропускания.
16. Произвести осаждение оксида циркония до первого экстремума пропускания.

17. Произвести осаждение оксида кремния до первого экстремума пропускания.

18. Произвести осаждение циркония, процесс прекратить при достижении второго экстремума.

19. Измерить спектральную кривую отражения полученного зеркала.

20. Сравнить характеристики зеркал, полученные во всех четырех случаях, т.е. зеркал: 1) Al-MgF₂-ZnS, 2) Al-SiO₂, 3) Al-SiO₂-ZrO₂, 4) Al-SiO₂-ZrO₂-SiO₂-2ZrO₂.

21. Во время осаждения всех материалов записывать силу тока накала, величину ускоряющего напряжения, силу тока эмиссии, время осаждения слоя, давление в вакуумной камере.

22. Для каждого образца указать длину волны, на которой производился контроль толщины наносимых слоев.

23. Измерить спектральные характеристики полученных покрытий.

Измерение коэффициента отражения металлодиэлектрических зеркал целесообразно проводить на спектрофотометре СФ-26.

Спектрофотометр СФ-26 с приставкой ПЗО-2 предназначен для измерения квадрата абсолютного и относительного коэффициентов зеркального отражения плоских поверхностей при угле падения света на образец, близком к нормальному. Приставку ПЗО-2 устанавливают на спектрофотометре вместо кюветного отделения. С ее помощью измеряют отношение величины монохроматического излучения I дважды отраженного от испытуемого образца, к величине потока, падающего на образец (квадрат абсолютного коэффициента отражения), или к величине потока, дважды отраженного от образца сравнения (квадрат относительного коэффициента отражения),

Отношение измеряют методом электрической автоколлимации, а его значение считывают со шкалы пропускания измерительного прибора спектрофотометра.

Оптическая схема приставки ПЗО-2 (схема V-W рефлексометра Д. Стронга) представлена на рис.4.3.

Монохроматический поток излучения, выходящий из щели 1 монохроматора, плоским зеркалом 2 направляется на сферическое зеркало 3, затем проходит через щель 4 и на цилиндрическую линзу 5 и попадает на сферическое зеркало 6, находящееся в положении I (вариант схемы V), которое направляет излучение на сферическое зеркало 7. После зеркала 7 поток излучения, отразившись от плоского зеркала 9, попадает на катод фотоэлемента 10 перед которым установлена кварцевая пластина 11. В плоскостях диафрагм 4, 8 предназначенных для устранения рассеянного света образуется изображение щели 1 с увеличением примерно 1*.

При введении в поток излучения испытуемого образца 12 зеркало 6 устанавливают в положение II (вариант схемы W и поток излучения дважды отражается от образца, минимальные размеры которого 17x20мм.

Для получения более точных результатов измерения перед пластиной 11 может быть помещен рассеиватель 13, выполненный из матированного кварцевого стекла или молочного стекла марки МС13 (в зависимости от используемой спектральной области).

Конструкция приставка ПЗО-2 представляет собой узел, устанавливаемый на спектрофотометр СФ-26 взамен кюветной камеры (рис 4.3). В приставке имеются два подвижных элемента (зеркало 6 и вертикальный столик 24 с окнами 25, в которых с помощью пружинных прижимов укрепляют два испытуемых образца один образец сравнения). Перемещение зеркала 6 осуществляется с помощью рукоятки 23, Обозначения «100» и измерения у рукоятки 23 соответствуют положениям I и II зеркала 6.

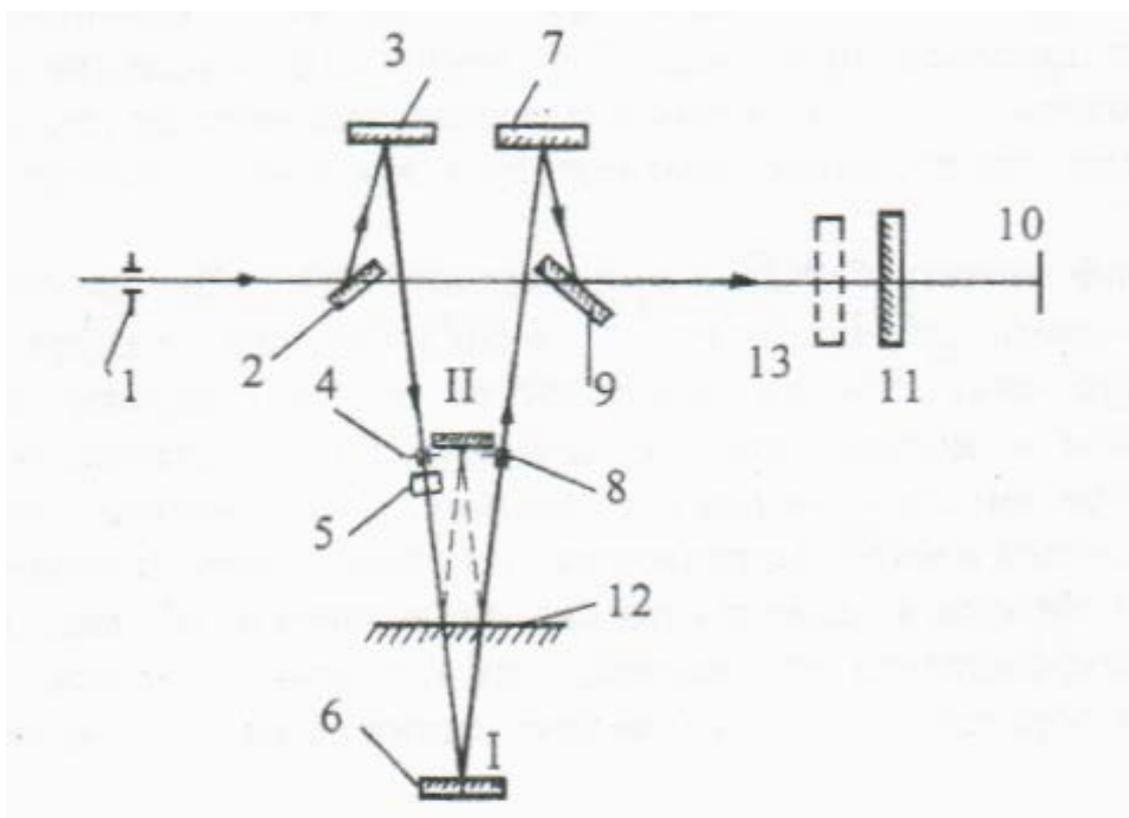


Рис. 4.3 Оптическая схема ПЗО-2. 1 - щель монохроматора, 2 - плоское зеркало, 3 - сферическое зеркало, 4 - щель, 5 - цилиндрическую линзу, 6 - сферическое зеркало, 7 - сферическое зеркало, 9 - плоское зеркало, 10 - катод фотоэлемента, 11 - кварцевая пластина.

Перемещение стол с образцами осуществляется рукояткой 27. Цифры «1», «2» и «3» рукоятки соответствуют трем фиксированным положениям столика, при которых в пучок вводятся испытуемые образцы или образец сравнения.

Рассеивающие пластины устанавливаются с внутренней стороны корпуса в выходное окно приставки и закрепляются винтами.

Методические указания и порядок выполнения работы

Изготовить металлодиэлектрические зеркала различных конструкций согласно методике, изложенной в приложении, и измерить коэффициент отражения этих покрытий в зависимости от длины волны. Работа выполняется с использованием резистивного и электронно-лучевого испарителей.

Оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Конструкции изготовленных зеркал.
2. Расчетные значения толщины слоёв металла. Расчет производится с использованием значений показателей преломления и коэффициентов поглощения металлов, которые приведены в таблице 4.1.
3. Расчётные спектральные зависимости энергетических коэффициентов отражения алюминия и одного из металлодиэлектрических зеркал (по заданию преподавателя) алюминия с нанесёнными на него диэлектрическими слоями.
4. Измеренные спектральные кривые энергетического коэффициента отражения изготовленных образцов.
5. Длину волны, на которой производился контроль толщины осаждаемых слоёв в процессе их формирования.
6. Значения пропускания в относительных единицах, соответствующие началу и концу осаждения слоёв диэлектриков. (Отсчёты на СФКТ- 751).
7. Выводы о проделанной работе.

Контрольные вопросы.

1. Материалы, применяемые для изготовления металлодиэлектрических зеркал.
2. Методы контроля толщины слоев при изготовлении металлодиэлектрических зеркал.
3. Возможные конструкции металлодиэлектрических зеркал.
4. Область применения металлодиэлектрических зеркал.
5. Сравнение методов контроля зеркал в процессе изготовления.
6. Почему контроль по измерению изменения пропускания в процессе осаждения более эффективен, чем по измерению изменения отражения.
7. На какие выходные параметры зеркал влияет дисперсия показателя преломления металлов?

8. Почему металлодиэлектрические зеркала крайне редко применяются в лазерных системах?

Основная литература.

1. Путилин Э.С. Оптические покрытия 2010год, СПб ГУИТМО 220с.
2. Гайнутдинов И.С., Несмелов Е.А., Михайлов А.В., Иванов В.П., Абзалова Г.И. Свойства и методы получения интерференционных покрытий для оптического приборостроения. Казань. Фэн 2003 423с.

Интернет ресурсы:

1. Э.С.Путилин Оптические покрытия, СПб ГУИТМО,200, 2005г СПб: СПб ГУИТМО, сайт кафедры <http://otd.ifmo.ru> .
2. Л.А.Губанова Оптические покрытия СПб, СПб ГУИТМО, 94, 2003г сайт кафедры <http://otd.ifmo.ru> .

1. Кикоин А.К., Кикоин И.К Молекулярная физика Лань, 2008 — Режим доступа: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=185. Электронно-библиотечная система. Издательство «Лань» [Электронный ресурс] .
2. Телеснин В.Р. Молекулярная физика Лань, 2009. — Режим доступа: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=391 Электронно-библиотечная система. Издательство «Лань» [Электронный ресурс] . __ Электронно-библиотечная система. Издательство «Лань» [Электронный ресурс]

4. Кузнецов Г. Методики определения параметров вакуумных систем. Лабораторный практикум режим доступа http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=1819Д. Электронно-библиотечная система. Издательство «Лань» [Электронный ресурс] .

Литература.

1. Фурман Ш.А. Тонкослойные оптические покрытия. Ленинград "Машиностроение", 1977, С. 264.
2. Друмметер Л.Ф., Хасс Г. Поглощение солнечного излучения и тепловое излучение напылённых покрытий. Физика тонких плёнок под редакцией Г. Хасса и Р.Э.Туна М: Мир,1973-Т.6.

Лабораторная работа № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ОСАЖДЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЕКТРОДЕЛИТЕЛЕЙ

Цель работы – выбор структуры спектроделителя (количества, показателей преломления, оптических толщин слоёв и порядка их расположения) в зависимости от крутизны спектральной кривой, положения областей максимального и минимального пропускания в шкале длин волн. Изготовление спектроделителя с заданными характеристиками. Измерение спектральных характеристик изготовленных спектроделителей. Сравнение полученных спектральных зависимостей с расчетными. Определение факторов, влияющих на характеристики спектроделителей в процессе осаждения.

Теоретическая часть

Интерференционные спектроделители используются в оптических приборах для выделения заданной спектральной области. В частности в приборах с дифракционными решетками они используются для устранения нерабочих порядков спектра, в киноаппаратуре для устранения тепловых потоков в виде холодных зеркал и теплофильтров; в цветном телевидении для разделения цветовых потоков в качестве дихроических элементов, а так же для подавления побочных полос пропускания диэлектрических узкополосных интерференционных светофильтров. Спектроделители являются диэлектрическими зеркалами в области спектра, где необходимо получить минимальное пропускание.

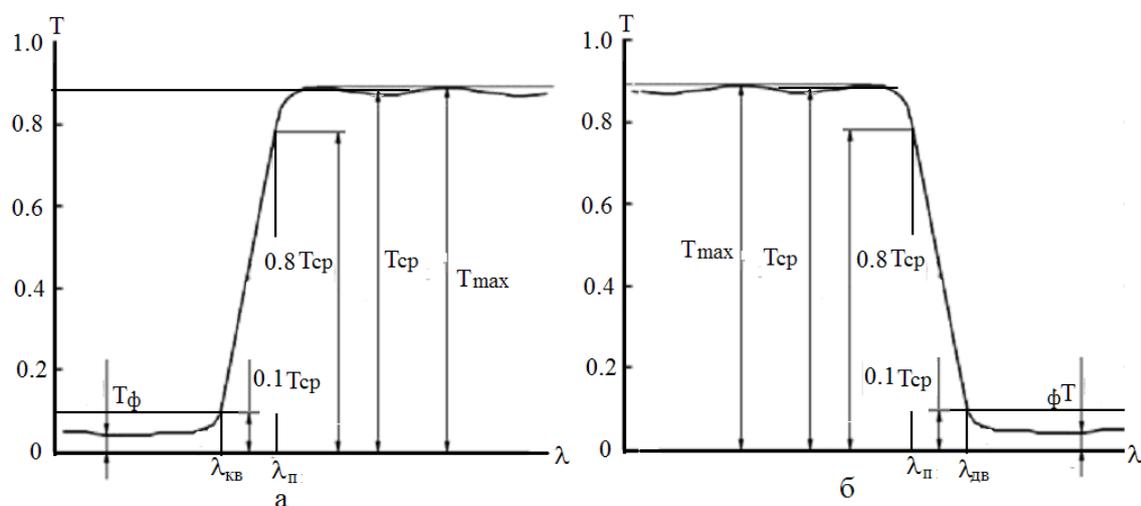


Рис. 5.1 Спектральная характеристика идеализированного спектроделителя, а – длинноволновый, б – коротковолновый.

На рис.5.1 представлена спектральная кривая пропускания идеализированного интерференционного отрезающего фильтра, основными характеристиками которого являются средний T_{cp} и максимальный T_{max} коэффициенты пропускания, ширина полосы пропускания $\Delta\lambda_{0,8}$ на уровне $T = 0,8T_{cp}$; ширина полосы подавления $\Delta\lambda_{0,1}$ на уровне $T = 0,1T_{cp}$; T_{ϕ} - коэффициент пропускания в нерабочем диапазоне длин волн (области гашения); длины волн $\lambda_{кв}$ и $\lambda_{дв}$, соответствующие пропусканию $T = 0,1T_{cp}$ на коротковолновой и длинноволновой границах зоны минимального пропускания. Крутизна коротковолновой K_k или длинноволновой K_d границ пропускания спектроделителя (отрезающего фильтра) определяется как отношение разности пропускания на уровнях $0,8T_{cp}$ и $0,1T_{cp}$ к разности соответствующих им длин волн, т.е.:

$$K_k = 0,7T_{cp} / (\lambda_{кв} - \lambda_n),$$

$$K_d = 0,7T_{cp} / (\lambda_{дв} - \lambda_n),$$

где $(\lambda_n$ - длина волны, на которой коэффициент пропускания $T = 0,8T_{cp}$; $(\lambda_{дв}, \lambda_{кв}$ - длин волн, на которой коэффициент пропускания $T = 0,1T_{cp}$).

Спектроделители можно разделить на два типа: коротковолновые и длинноволновые отрезающие интерференционные фильтры, отличающиеся тем, что в первом случае область высокого пропускания лежит в длинноволновой области спектра (рис.5.1а), а во втором в коротковолновой (рис.5.1б)

Для понимания процесса формирования спектроделителей, образованных чередующимися слоями диэлектриков, необходимо рассмотреть симметричные системы слоёв диэлектриков, из которых возможно формирование диэлектрических зеркал, спектроделителей, светофильтров и т.д., т.е. систем, которые имеют плоскость симметрии. Минимальное число слоёв такой системы - три. Если мы проводим через середину второго слоя системы плоскость, то необходимо, чтобы $\varphi_1 = \varphi_3$, а $n_1 = n_3$. Такая система будет называться симметричной. Особенностью симметричных систем является то, что диагональные элементы матрицы интерференции, описывающей их свойства, одинаковы. Положим, что $\varphi_1 = \varphi_3 = \varphi_1$, $n_1 = n_3 = n_1$, и определим матричные элементы симметричного мультислоя. Они равны:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{11} = \cos 2\varphi_1 \cos \varphi_2 - \frac{1}{2} \left(\frac{n_1}{n_2} + \frac{n_2}{n_1} \right) \sin 2\varphi_1 \sin \varphi_2, \\ m_{12} = \frac{1}{n_1} \sin 2\varphi_1 \cos \varphi_2 + \left(\frac{1}{n_2} \cos^2 \varphi_1 - \frac{n_2}{n_1^2} \sin^2 \varphi_1 \right) \sin \varphi_2, \\ m_{21} = n_1 \sin 2\varphi_1 \cos \varphi_2 + \left(n_2 \cos^2 \varphi_1 - \frac{n_1^2}{n_2} \sin^2 \varphi_1 \right) \sin \varphi_2, \\ m_{22} = \cos 2\varphi_1 \cos \varphi_2 - \frac{1}{2} \left(\frac{n_1}{n_2} + \frac{n_2}{n_1} \right) \sin 2\varphi_1 \sin \varphi_2. \end{array} \right. \quad (5.1)$$

Как видно из (5.1) $m_{11} = m_{22}$ и тогда матрицу интерференции можно записать в таком виде:

$$\begin{vmatrix} \cos \wp & \frac{i}{N} \sin \wp \\ iN \sin \wp & \cos \wp \end{vmatrix}, \quad (5.2)$$

где: $\cos \wp = m_{11} = m_{22}$, $\sin^2 \wp = m_{12} \times m_{21}$, $N^2 = \frac{m_{21}}{m_{12}}$.

Такая формальная запись удобна при рассмотрении многослойных систем, в которых симметричные системы многократно повторяются. Тогда при описании такой системы слоёв матрица интерференции будет иметь вид (для двух периодов):

$$M = \begin{vmatrix} m_{11} & im_{12} \\ im_{21} & m_{22} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} m_{11} & im_{12} \\ im_{21} & m_{22} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos \wp & \frac{i}{N} \sin \wp \\ i \sin \wp & \cos \wp \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \cos \wp & \frac{i}{N} \sin \wp \\ i \sin \wp & \cos \wp \end{vmatrix}. \quad (5.3)$$

Для нахождения матрицы интерференции системы можно возвести в квадрат матрицу интерференции симметричного слоя, а можно сказать, что слой повторяется два раза.

$$M = \begin{vmatrix} \cos \wp & \frac{i}{N} \sin \wp \\ iN \sin \wp & \cos \wp \end{vmatrix}^2 = \begin{vmatrix} \cos 2\wp & \frac{i}{N} \sin 2\wp \\ iN \sin 2\wp & \cos 2\wp \end{vmatrix}. \quad (5.4)$$

Это значит, что его толщина увеличивается в два раза, а показатель преломления остаётся прежним.

Если такая система повторяется много раз, например, n -раз, то это эквивалентно тому, что эффективная фазовая толщина слоя увеличивается в n -раз, а эффективный показатель преломления остаётся прежним. Задача сводится к тому, что необходимо вычислить эффективный показатель преломления такой системы и её эффективную фазовую толщину. Эффективная фазовая толщина определена выше: $\cos \wp = m_{11} = m_{22}$. В

таким виде эту величину не очень удобно анализировать, поскольку φ_1 и φ_2 не всегда кратные числа. Рассмотрим наиболее простую ситуацию, когда $\varphi_2 = 2\varphi_1$, если $\varphi_1 = \varphi$, а $\varphi_2 = 2\varphi$, то:

$$m_{11} = \cos^2 2\varphi - \frac{1}{2} \left(\frac{n_1^2 + n_2^2}{2n_1n_2} \right) \sin^2 2\varphi.$$

После преобразования этот матричные элементы имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{11} = m_{22} = \left[\cos^2 2\varphi - \frac{n_1^2 + n_2^2}{(n_1 + n_2)^2} \right] \times \frac{(n_1 + n_2)^2}{2n_1n_2}, \\ m_{12} = \frac{(n_1 + n_2)^2}{2n_1} \left(\cos 2\varphi + \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right) \sin 2\varphi, \\ m_{21} = \frac{(n_1 + n_2)^2}{2n_2} \left(\cos 2\varphi - \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right) \sin 2\varphi. \end{array} \right. \quad (5.5)$$

Далее проанализируем, как фазовая толщина такой системы φ меняется в зависимости от фазовой толщины формирующего его слоя:

$$\varphi = \arccos \frac{(n_1 + n_2)^2}{2n_1n_2} \left[\cos^2 2\varphi - \frac{n_1^2 + n_2^2}{(n_1 + n_2)^2} \right]. \quad (5.6)$$

Как видно из изображённой на рисунке 5.2 зависимости, фазовая толщина симметричной трёхслойной системы будет расти с ростом фазовой толщины образующих эту систему слоёв.

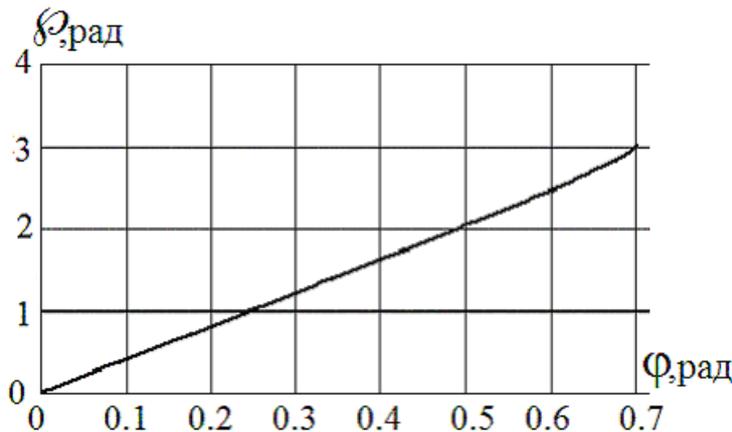


Рис. 5.2. Зависимость фазовой толщины симметричной трёхслойной системы от фазовой толщины образующих её слоёв при $n_1=2$, $n_2=1.45$.

Далее определим, как изменяется эффективный показатель преломления симметричной трёхслойной системы с ростом фазовой толщины образующих эту систему слоёв. Вспоминая, что $\varphi_2 = 2\varphi$ величина N^2 есть:

$$N^2 = n_1^2 \frac{\cos 2\varphi - (n_1 - n_2)/(n_1 + n_2)}{\cos 2\varphi + (n_1 - n_2)/(n_1 + n_2)}. \quad (5.7)$$

Выражение (5.7) целесообразнее записать в виде дроби, потому что удобнее иметь дело с величиной меньшей единицы для оценки поведения этой функции. Проанализируем, как ведёт себя эффективный показатель преломления в зависимости от фазовой толщины слоёв и от величины показателей преломления, а вернее даже не от величины показателей преломления, а от их относительной разности. Очевидно, что в случае, если фазовая толщина слоя равна нулю, то эффективный показатель преломления $N^2 = n_1 n_2$. Фазовая толщина слоя равна нулю, когда слой отсутствует или когда длина волны равна бесконечности, т.е. при достаточно больших длинах волн или при очень малых толщинах слоя.

Далее проанализируем, что будет происходить по мере увеличения фазовой толщины слоя. Изобразим зависимость N^2 от φ . Легко убедиться, что в формуле (5.7) дробь может быть отрицательной и N - мнимой величиной. Поэтому лучше рассмотреть величину N^2 . Пусть показатели преломления слоёв n_1 и n_2 , $n_1 > n_2$. Когда $\cos 2\varphi$ достигает значения $(n_1 - n_2)/(n_1 + n_2)$, числитель обращается в нуль. При дальнейшем увеличении фазовой толщины при $2\varphi = \pi/2$, $\varphi = \pi/4$ $N^2 = -n_1^2$, далее при $2\varphi > \pi/2$, $\varphi > \pi/4$ $\cos 2\varphi$ становится равным $-(n_1 - n_2)/(n_1 + n_2)$ и знаменатель обращается в нуль. Это точка разрыва на графике. Когда $\cos 2\varphi = -1$, $\varphi = \pi$, эффективный показатель преломления равен:

$$N^2 = \frac{n_1^3}{n_2}. \quad (5.8)$$

Очевидно, в этой зависимости будут симметричные точки, поскольку косинус меняется от 1 до 0, дальше от 0 до -1 и т.д.

На рис.5.3 изображена зависимость N^2 , определяемая формулой (5.7), от фазовой толщины слоёв для двух случаев: $n_1 < n_2$ и $n_1 > n_2$. Как видно из этого рисунка, на графических зависимостях наблюдаются зоны разрыва функции, а также зоны с отрицательным и положительным значением величины N^2 , которые зависят от знака разности показателей преломления образующих систему слоёв. В этой ситуации можно легко написать и коэффициент отражения системы слоёв, осаждённой на подложку через эффективный показатель преломления симметричной системы слоёв. Коэффициент отражения для однослойной системы:

$$R = \frac{n_1 (n_0 - n_m)^2 \cos^2 \varphi_1 + (n_0 n_m - n_1^2)^2 \sin^2 \varphi_1}{n_1 (n_0 + n_m)^2 \cos^2 \varphi_1 + (n_0 n_m + n_1^2)^2 \sin^2 \varphi_1}.$$

Для симметричной системы слоёв коэффициент отражения будет иметь вид:

$$R = \frac{N^2 (n_0 - n_m)^2 \cos^2 \varphi + (n_0 n_m - N^2)^2 \sin^2 \varphi}{N^2 (n_0 + n_m)^2 \cos^2 \varphi + (n_0 n_m + N^2)^2 \sin^2 \varphi}. \quad (5.9)$$

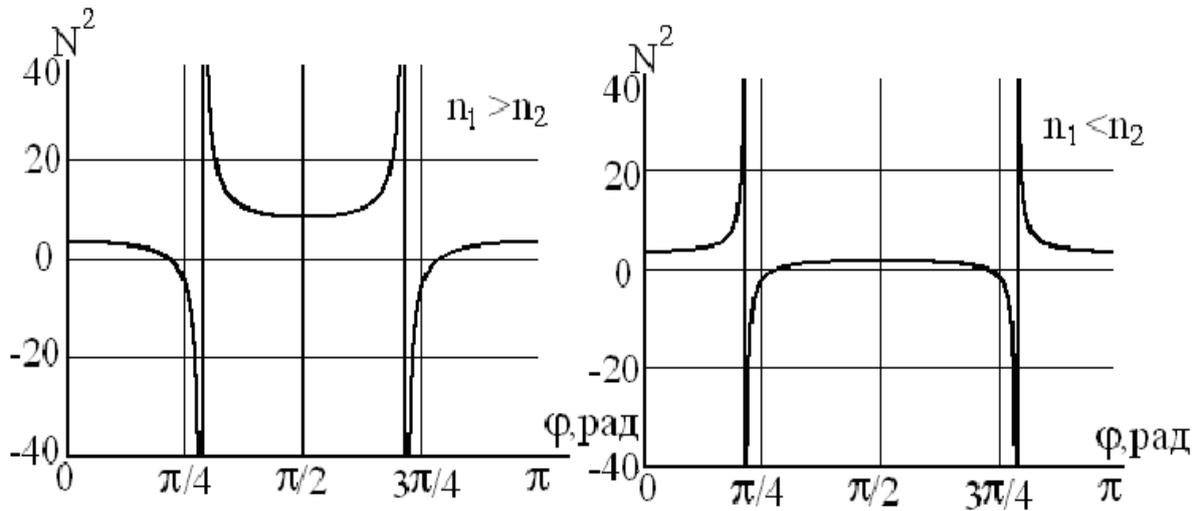


Рис. 5.3 Зависимость величины N^2 от фазовой толщины образующих симметричную трёхслойную систему слоёв для $n_1 < n_2$ и $n_1 > n_2$

Ниже проанализируем, что будет получаться в разных зонах, т.е. при различных значениях фазовой толщины формирующих систему слоёв. Особенно интересны зоны, где величина N^2 имеет разрыв. Если посмотреть на зависимость (5.9), то нетрудно сообразить, что коэффициент отражения стремится к единице. Эти зоны в литературе получили название зон подавления (в этих областях пропускание минимально), на самом деле это зоны высокого отражения. Зоны, где величина N^2 имеет малое значение – это зоны прозрачности диэлектрической системы. Если выполняется условие $N^2 = n_0 n_m$, то такая система будет иметь минимум отражения при той фазовой толщине, которая соответствует точке пересечения.

Выше рассмотрены симметричные системы и показано, что такие системы может быть записаны как один слой и в этой связи подобное рассмотрение полезно при рассмотрении многослойных систем.

Далее рассмотрим, что будет происходить с амплитудным и энергетическим коэффициентом отражения по мере увеличения количества слоёв. Величина различия в показателях преломления слоёв приведёт к тому, что для получения одного и того же коэффициента отражения потребуется большее или меньшее количество слоёв.

При $n_1 > n_2$, предел $r_{(2k+1)}$ при $k \rightarrow \infty$ равен «-1». Предел $r_{(2k+1)}$ при $n_2 > n_1$ равен 1. В первом случае разность фаз между падающим и отражённым излучением будет равна π , во втором случае разность фаз между падающим и отражённым излучениями 0 или 2π . Предел энергетического коэффициента отражения при k стремящемся к бесконечности равен 1.

На рис. 5.4 - 5.6 изображены зависимости N^2 , $\cos \varphi$, модуля амплитудных коэффициентов отражения $|r|$, разности фаз между падающей и отражённой волнами (ρ) и энергетических коэффициентов (R) отражения для симметричных мультислоёв (В2НВ и Н2ВН) систем, содержащих четыре симметричных мультислоя от фазовой толщины формирующих эти мультислои слоёв, здесь и далее В - четвертьволновый слой с высоким показателем преломления, Н - четвертьволновый слой с низким показателем преломления; Как видно из рисунков 5.4 и 5.6 для мультислоёв В2НВ, как одиночных, так и образующих систему, величина эквивалентного показателя преломления не меняется, так же как и для мультислоёв Н2ВН. Однако, сравнивая распределение величины N^2 от фазовой толщины образующих симметричный мультислои слоёв видно, что характер распределения различается. Разрыв функции N^2 происходит при разных значениях фазовой толщины слоёв. Величина $\cos \varphi$ в зависимости от фазовой толщины слоёв, как это и следовало ожидать из выражения 5.6, не зависит от порядка расположения слоёв и является симметричной функцией. Сравнение рисунков 5.4 - 5.6 показывает, что количество осцилляций функции $\cos \varphi$ зависит от числа слоёв, образующих систему. Экстремумы амплитудного коэффициента отражения при увеличении числа слоёв соответствуют области максимального значения величины $\cos \varphi$. Положение полосы максимального отражения определяется расстоянием между ближайшими минимумами, расположенными вблизи максимума функции $\cos \varphi$. Величины амплитудных и энергетических коэффициентов отражения в максимуме определяются порядком расположения и разностью величин показателей преломления слоёв, формирующих систему, как это и следует из выражений 5.7, 5.9.

Сравнение амплитудных и энергетических коэффициентов отражения диэлектрических систем, образованных повторением симметричных мультислоёв на подложке, показывает существенное различие в их спектральных характеристиках. Системы, образованные мультислоями В2НВ имеют малое отражение при значениях фазовых толщин слоёв меньших 0.6, т.е. в коротковолновой области спектра. Системы, образованные многократным повторением мультислоёв Н2ВН имеют малое отражение при фазовых толщинах больших 1.05, т.е. в длинноволновой области спектра. Разность фаз между падающим и отражённым излучением для систем, образованных повторением мультислоёв в области максимума отражения имеет приблизительно линейный характер, но величина $d\rho/d\varphi$ различается знаком.

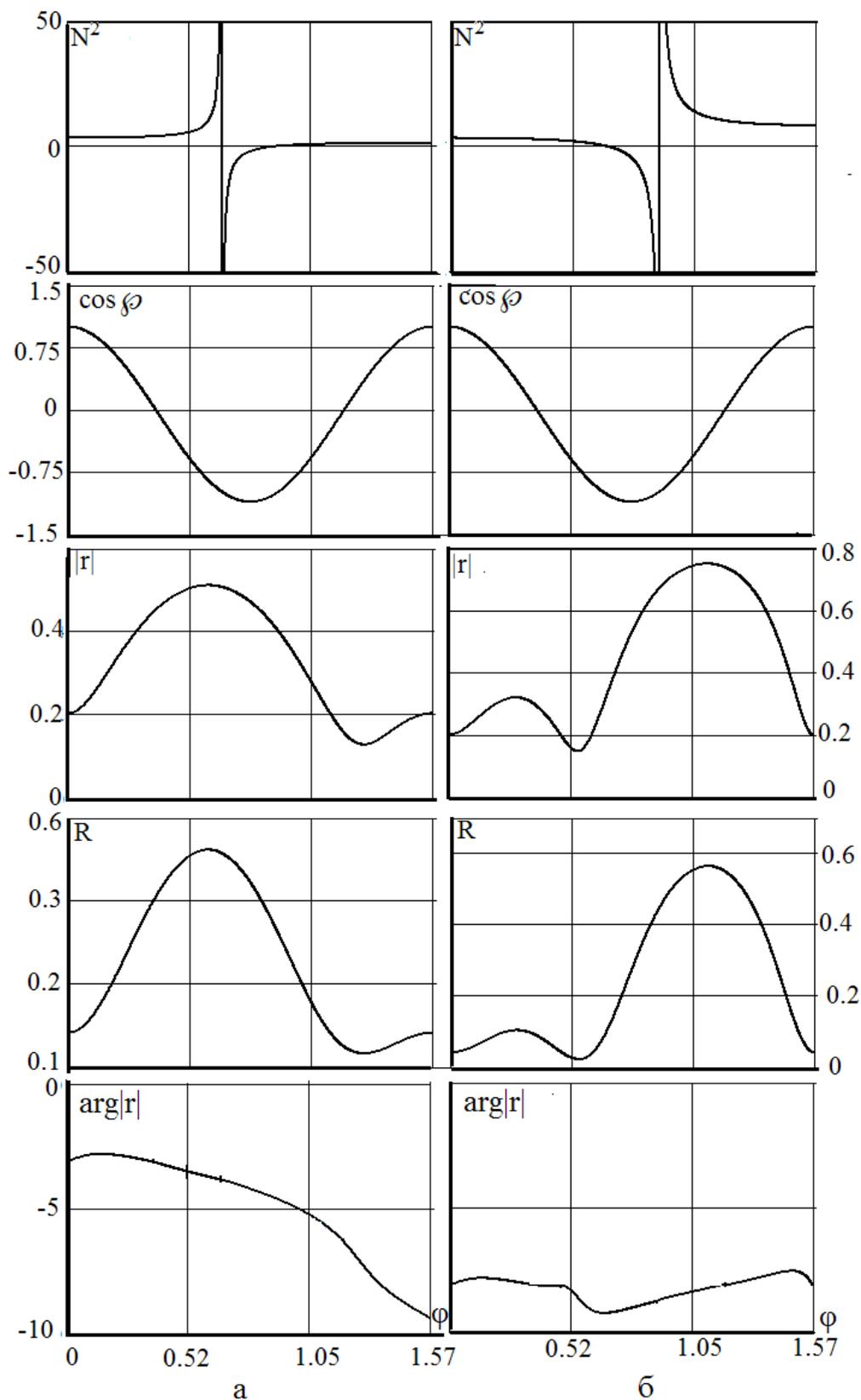


Рис. 5.4. Зависимость эквивалентных фазовой толщины и показателя преломления симметричной системы, а также модуля и аргумента амплитудного коэффициента и энергетического коэффициента отражения от фазовой толщины слоёв покрытия, состоящего из симметричной системы слоёв (Н2ВН - фрагмент а, В2НВ - б) от фазовой толщины слоёв. $n_H=1.45$, $n_B=2.30$

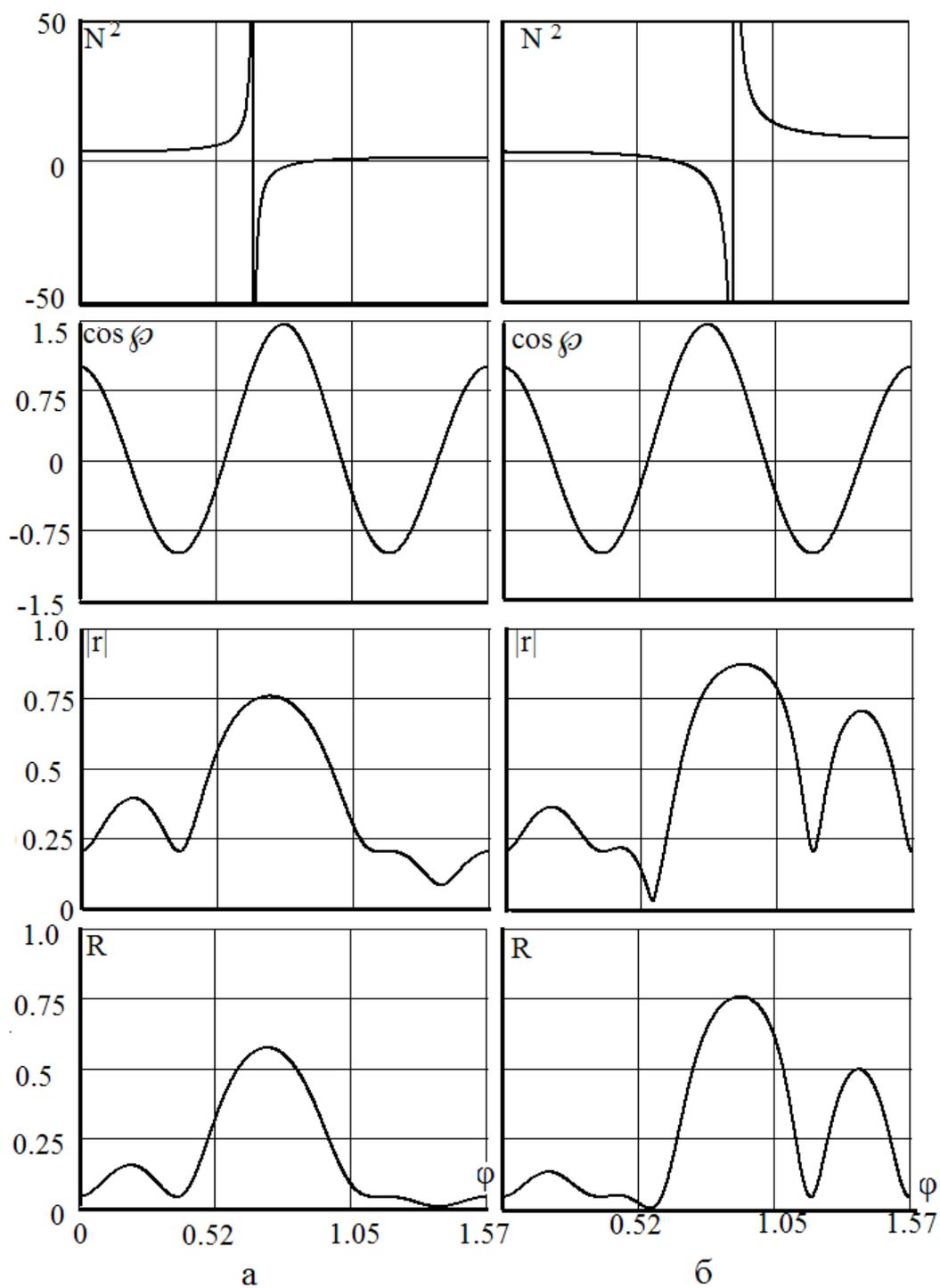


Рис. 5.5 Зависимость эквивалентных фазовой толщины и показателя преломления симметричной системы, а также модуля амплитудного коэффициента и энергетического коэффициента отражения покрытия, состоящего из двух симметричных систем слоёв (Н2ВН- фрагмент а, В2НВ - б) от фазовой толщины слоёв при $n_H=1.45$, $n_B=2.30$.

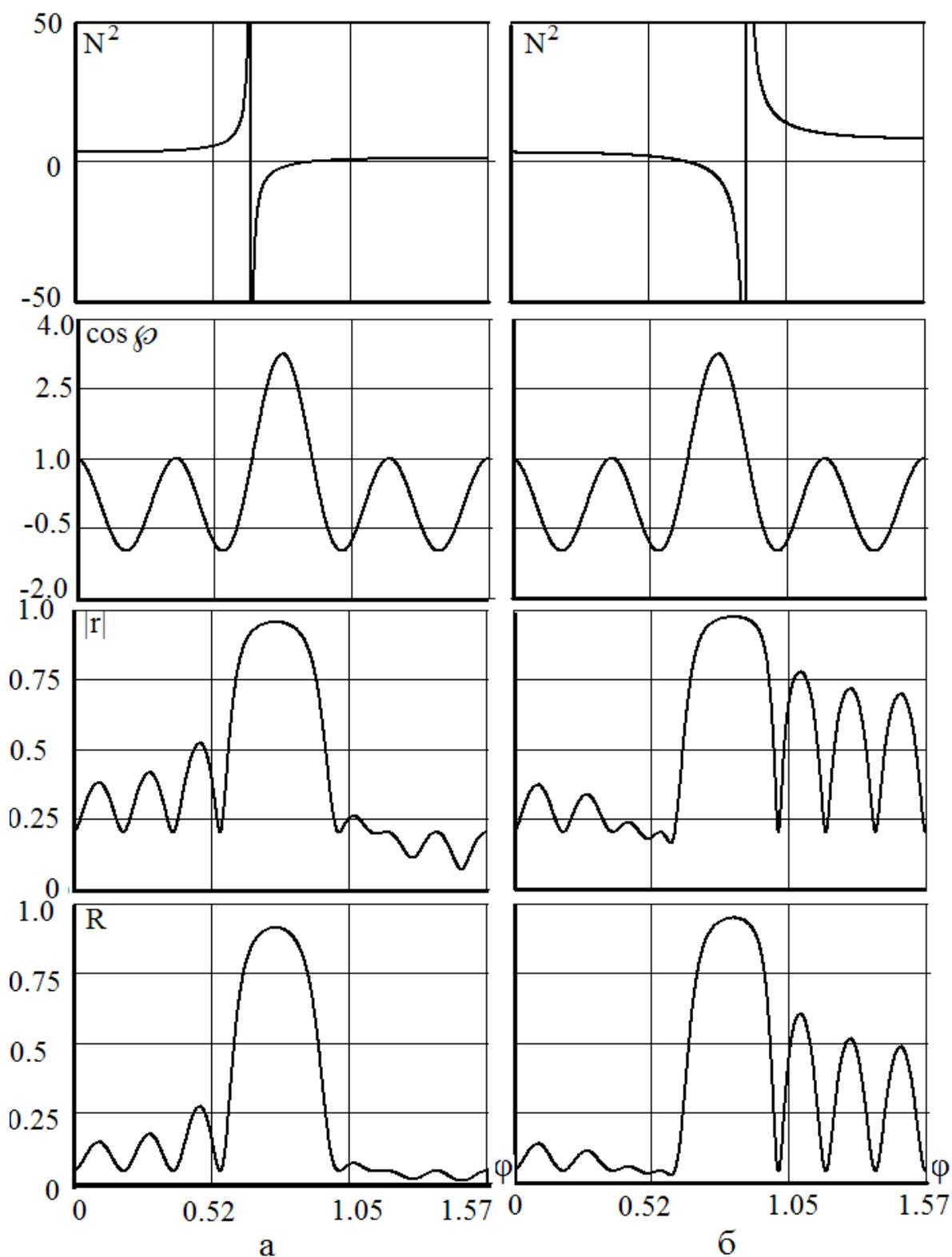


Рис. 5.6. Зависимость эквивалентных фазовой толщины и показателя преломления симметричной системы, а также модуля амплитудного коэффициента и энергетического коэффициента отражения покрытия, состоящего из четырёх симметричных систем слоёв (H2BH- фрагмент а, B2HB - б) от фазовой толщины слоёв при $n_H=1.45$, $n_B=2.30$.

Анализ рисунков 5.4-5.6 показывает, что симметричная ячейка Н2ВН позволяет получать длинноволновые, ячейка В2НВ коротковолновые спектроделители.

Рассмотрим спектроделитель вида:

$m\Pi В2НВ... 2В2НВ$,

что идентично структуре: $\Pi(В2НВ)^{0,5(m-1)}$

здесь m - цифра перед буквой Π обозначает количество слоев покрытия, цифра перед $В$ и $Н$ - кратность данного слоя относительно четвертьволнового.

Далее проанализируем, как количество подсистем (слоёв в системе) влияет на крутизну и ширину полосы гашения. На рис.5.7а и 5.7б представлены спектральные кривые пропускания для $m = 13, 15, 17$. Это длинноволновые спектроделители. Как видно из рисунка с увеличением числа слоёв незначительно увеличивается зона гашения, существенно уменьшается пропускание в минимуме и меняется крутизна спектроделителя (рис.5.7б)

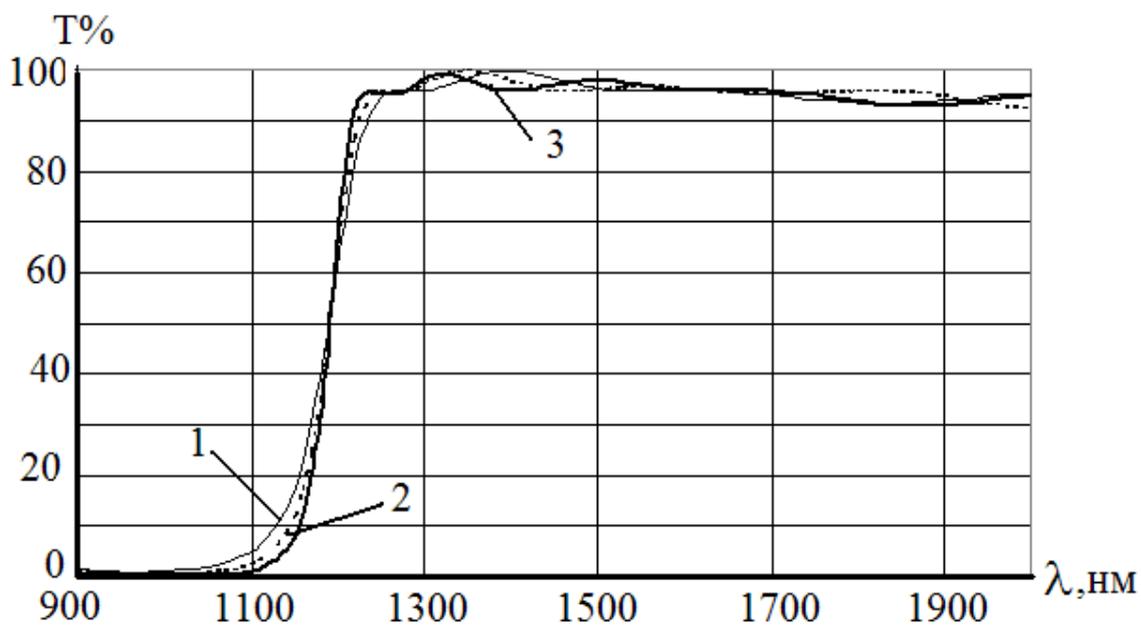


Рис. 5.7а Спектральные кривые пропускания спектроделителей, сформированных из симметричной ячейки (В2НВ) при $n_B=2.3$ $n_H= 1.45$ и $\lambda_0=500\text{nm}$: 1 - количество симметричных ячеек 6, 2-7, 3-8

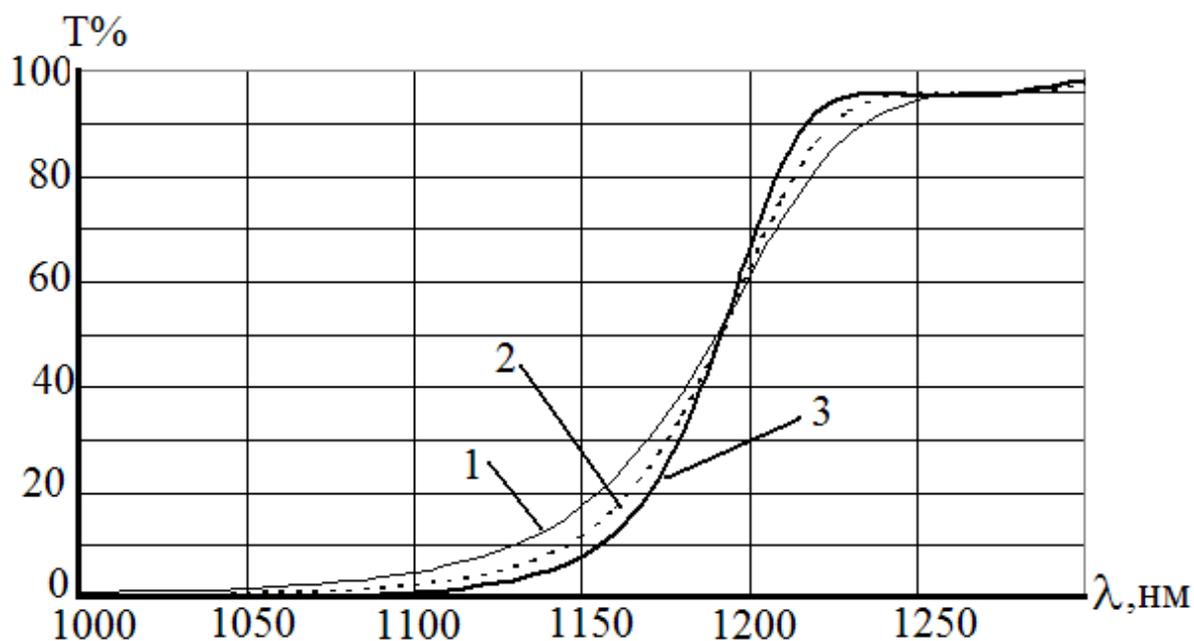


Рис. 5.7б Спектральные кривые пропускания (область максимального перепада) длинноволновых спектроделителей, сформированных из симметричной ячейки (B2NB) при $n_B=2.3$ $n_H=1.45$ и $\lambda_0=500\text{nm}$: 1 - количество симметричных ячеек 6, 2-7, 3-8

На рис. 5.7в представлено изменение пропускания по мере формирования спектроделителя, состоящего из 6 симметричных ячеек (B2NB).

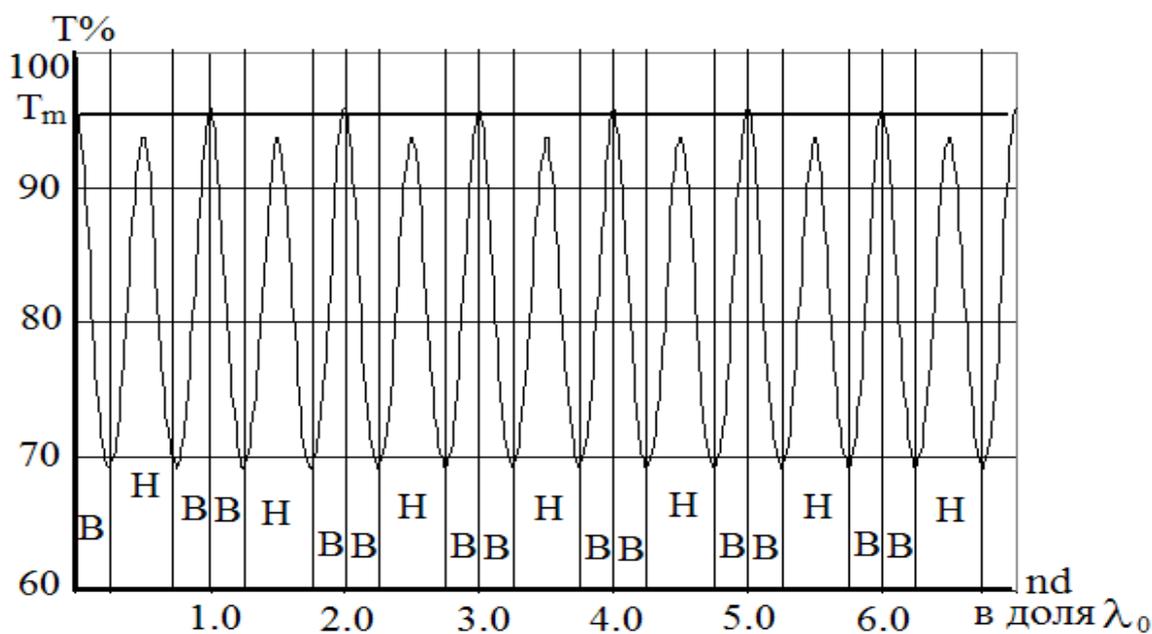


Рис. 5.7в Изменение пропускания по мере формирования спектроделителя (13 п В 2Н 2В.....В)

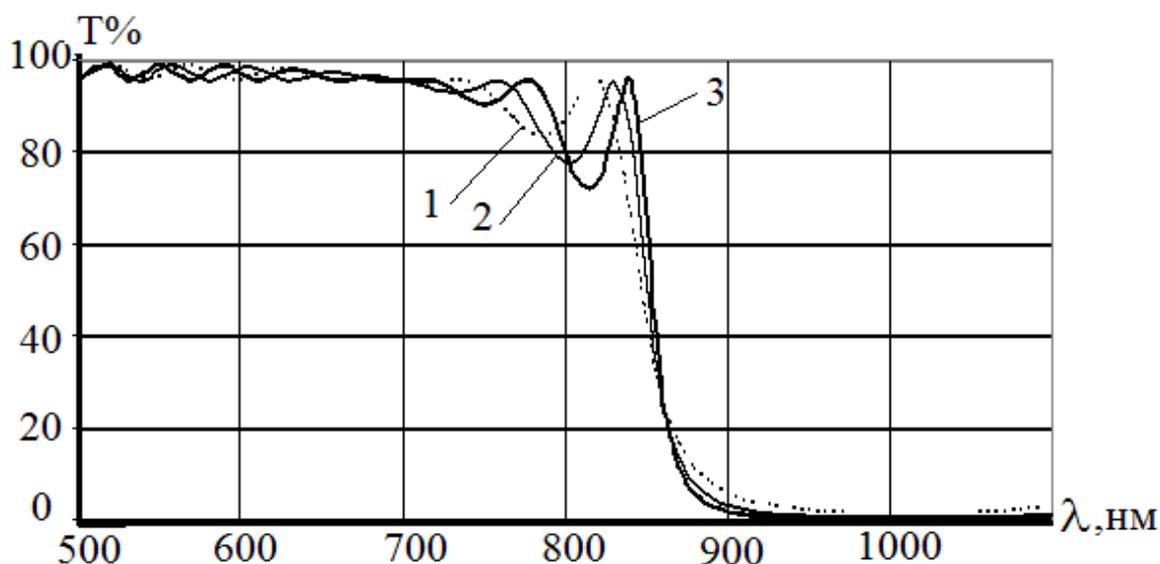


Рис.5.8а Спектральные кривые пропускания коротковолновых спектроделителей, сформированных из симметричной ячейки (Н2ВН) при $n_B=2.3$ $n_H=1.45$ и $\lambda_0=500\text{nm}$: 1 - количество симметричных ячеек 6, 2-7, 3-8

Рассмотрим аналогичную картину для коротковолновых спектроделителей. В этом случае в основе спектроделителя лежит ячейка вида: (Н2ВН). Как и выше проанализируем покрытия, состоящие из 13,15 и 17 слоёв, т.е. m ПН2В... 2В2Н2ВН, что идентично структуре $\Pi(\text{Н2ВН})^{0,5(m-1)}$ ($m=13,15,17$). Спектральные характеристики таких систем представлены на рис. 5.8а и 5.8б

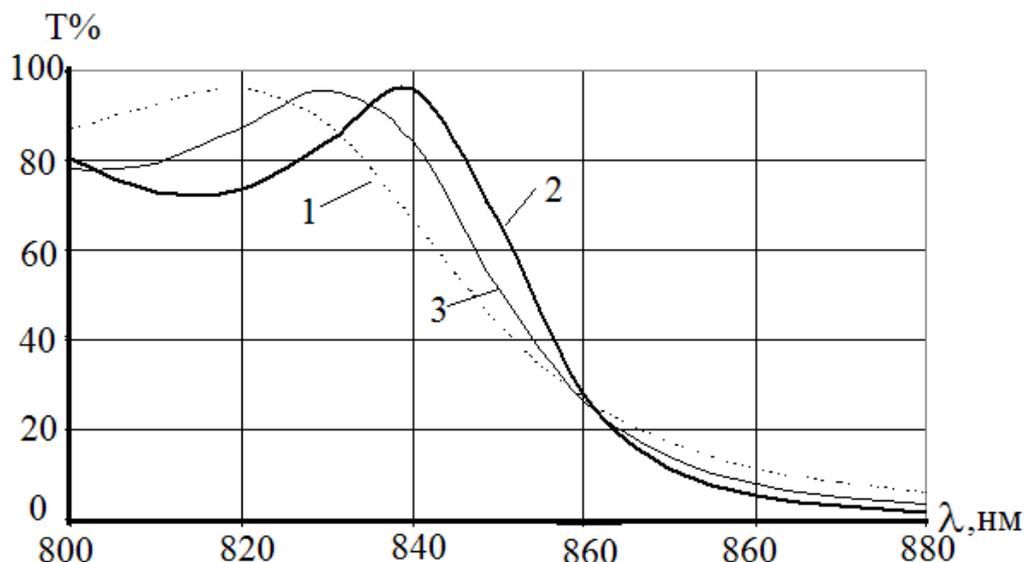


Рис. 5.8б Спектральные кривые пропускания (область максимального перепада) коротковолновых спектроделителей, сформированных из симметричной ячейки (Н2ВН) при $n_B=2.3$ $n_H=1.45$ и $\lambda_0=500\text{nm}$: 1 - количество симметричных ячеек 6, 2-7, 3-8

На рис. 5.8в представлено изменение пропускания по мере формирования спектроделителя, состоящего из 6 симметричных ячеек.

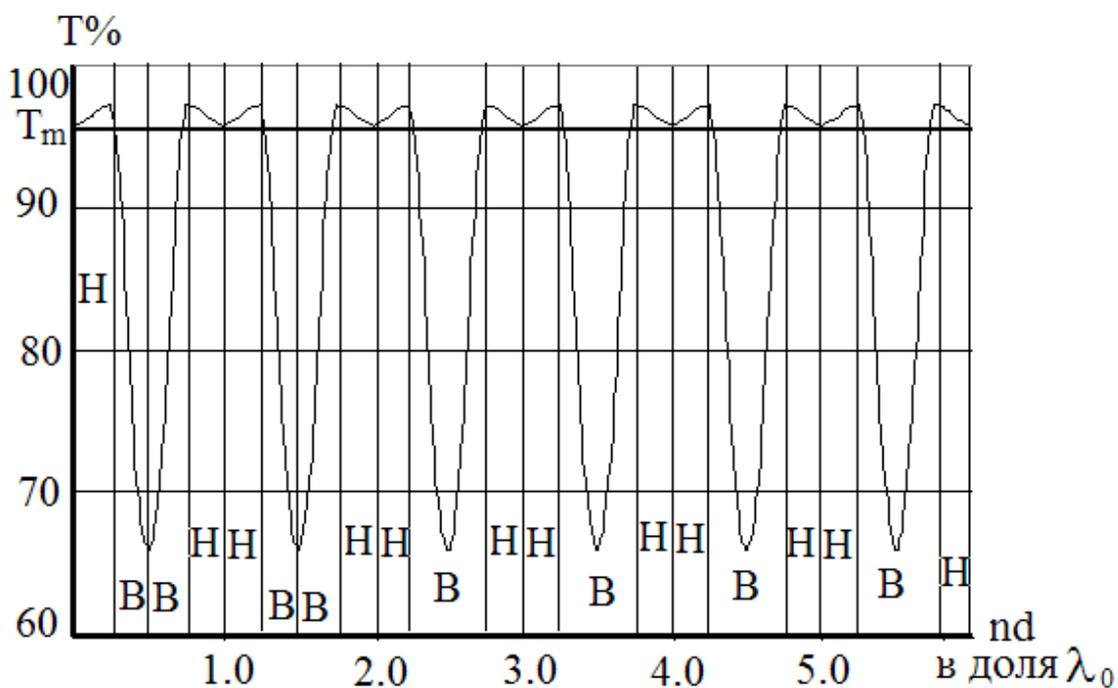


Рис. 5.8в Изменение пропускания по мере формирования спектроделителя (13 п Н 2В 2Н 2В...Н) на длине волны λ_0

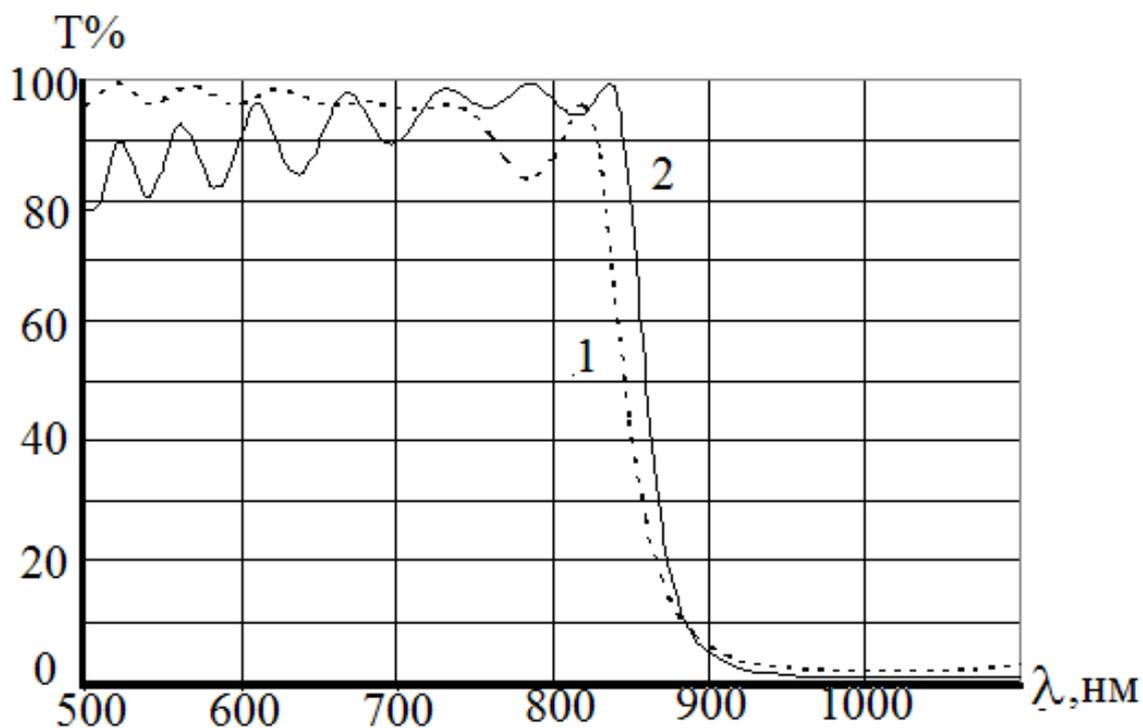


Рис. 5.9 Спектральные характеристики систем (Н2ВН) $\lambda_0=500\text{nm}$
 кривая 1 и 13 П 1,145 В 1,096 НВН... В 0,995 Н 1,234 В
 $\lambda_0=1000\text{nm}$ при $n_B=2.3$ $n_H=1.45$.

Используя современные методы синтеза можно оптимизировать спектральные кривые за счёт применения слоёв с оптическими толщинами не кратными $0,25 \lambda_0$, что позволяет несколько увеличить крутизну при и уменьшения T_{cp} в полосе прозрачности. В качестве примера можно использовать следующие системы [2].

$$13 \text{ П } 1,145 \text{ В } 1,096 \text{ НВН... В } 0,995 \text{ Н } 1,234 \text{ В} \quad (5.10)$$

$$13 \text{ П } 1,301 \text{ В } 0,955 \text{ НВНВН... В } 0,152 \text{ Н } 0,151 \text{ В} \quad (5.11)$$

Спектральные характеристики таких систем представлены на рис. 5.9, 5.10.

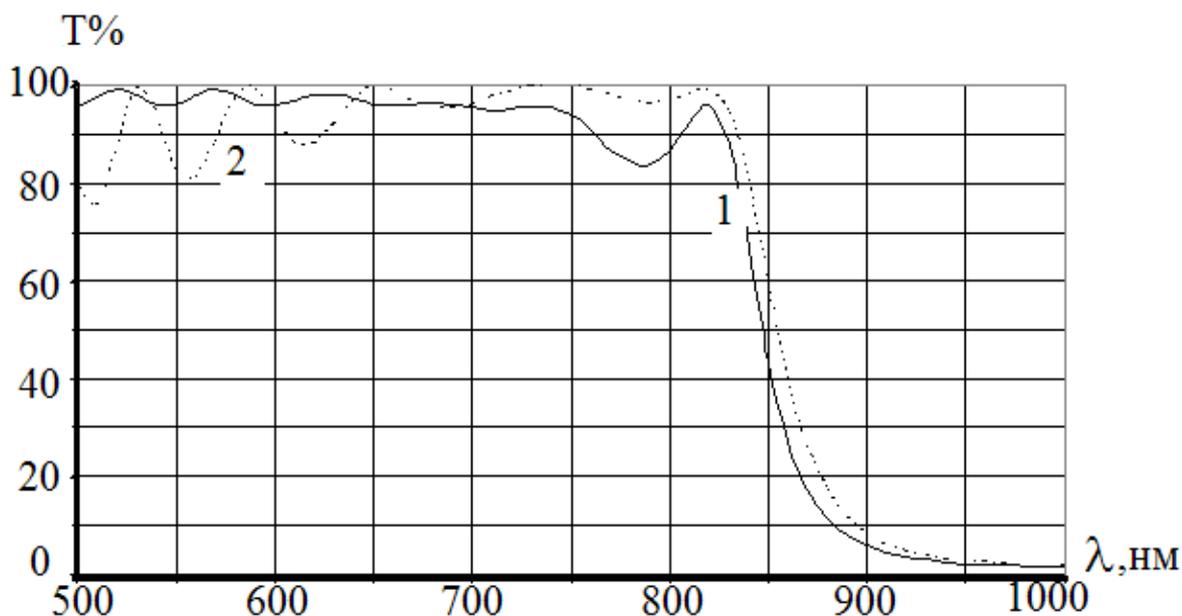


Рис. 5.10 Спектральная характеристика системы (Н2ВН)⁶
 $\lambda_0=500\text{нм}$ кривая 1 и 13 П 1,301 В 0,955 НВНВН... В 0,152 Н 0,151 В
 $\lambda_0=1000\text{нм}$ при $n_B=2.3$ $n_H= 1.45$.

Наличие в таких системах значительного числа слоев с оптической толщиной, не кратной $\lambda/4$, существенно затрудняет реализацию покрытий, а ошибки в слоях, неизбежно возникающие в процессе формирования системы, заметно ухудшают спектральную кривую. Кроме того, эти спектроделители имеют недостаточно широкую рабочую область. Современные методы синтеза позволяют найти конструкцию спектроделительного покрытия, лишённого вышеперечисленных недостатков, но состоящего из слоёв с неравной четверти длины волны оптической толщиной. Спектральная характеристика такого покрытия представлена на рис.5.11.

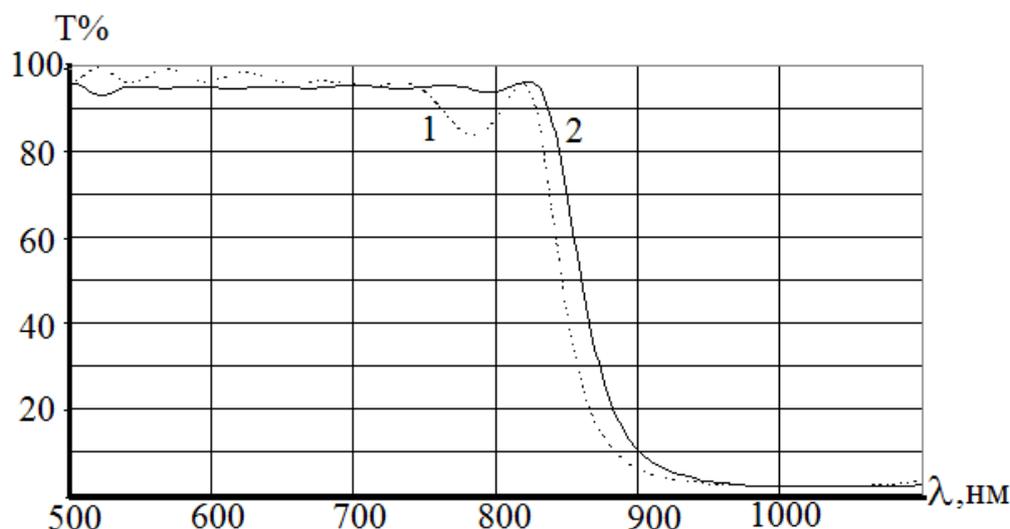


Рис. 5.11 Спектральная характеристика системы (Н2ВН)⁶ $\lambda_0=500\text{nm}$ (кривая 1) и системы, состоящей из 13 слоёв, все толщины которых не кратны $\lambda_0/4$ (кривая 2) при $n_{\text{В}}=2.3$ $n_{\text{Н}}= 1.45$.

Содержание работы

1. Произвести формирование многослойной системы (спектроредителя), определяемой конструкцией:

ПВ2Н2В2Н2В2Н2В2Н2В2НВ где: Н и В четвертьволновые слои с низким ($n_{\text{Н}}=1,38$, MgF_2) и высоким ($n_{\text{В}}=2,30$, ZnS) показателями преломления соответствующие длине волны $\lambda_0=450\text{nm}$

1.1. Осаждение четвертьволнового слоя прекращается при достижении первого (ZnS) или второго экстремумов пропускания для второго и последующих слоёв.

2. Произвести формирование многослойной системы (спектроредителя), определяемой конструкцией:

ПН2В2Н2В2Н2В2Н2В Н где: Н и В четвертьволновые слои с низким ($n_{\text{Н}}=1,38$, MgF_2) и высоким ($n_{\text{В}}=2,30$, ZnS) показателями преломления соответствующие длине волны $\lambda_0=500\text{nm}$

2.1. При изготовлении многослойных систем контроль вести по плоскопараллельной пластине с осаждённым на ней четвертьволновым слоем сернистого цинка.

3. Измерить спектральные зависимости полученных многослойных систем (спектроредитель и контрольный образец), на спектрофотометре СФ-26 или СФ-46: измерение произвести в диапазоне длин волн (380-1000)nm.

4. При изготовлении спектроредителей записывать величину пропускания в момент начала осаждения слоя и величину

пропускания при достижении экстремального значения и окончания формирования каждого слоя.

5. При изготовлении спектроделителей записывать давление в рабочей камере и величину тока накала, подаваемого на испаритель, время осаждения каждого слоя, изменение отсчета на СФКТ-751.

Методические указания и порядок выполнения работы

Произвести осаждение слоев, формирующих спектроделитель на вакуумной установке, согласно методике, изложенной в приложении. Работа выполняется с использованием резистивного испарителя пленкообразующих материалов в вакууме.

Оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Структуру изготовленных спектроделителей.
2. Изменение отсчетов СФКТ-751В при осаждении слоев.
3. Сравнить значения отсчетов на СФКТ-751В соответствующие расчетным и экспериментальным значениям при формировании слоёв. Оценить величину возможной ошибки в оптической толщине сформированных слоёв.
4. Спектральные характеристики спектроделителей и контрольного образца, измеренные на СФ-26 или СФ-46, сравнить с расчетной характеристикой этих спектроделителей (см. рис.5.8 а, б и 5.9 а, б).
5. Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Область применения спектроделителей.
2. Возможные конструкции спектроделителей.
3. Виды спектроделителей.
4. Как влияет изменение условий осаждения на положение спектральной характеристики спектроделителей?
5. С какой целью в работе контроль при изготовлении спектроделителя велся по образцу со слоем ZnS, оптическая толщина которого составляет $0,25 \lambda_0$?
6. С какой целью при изготовлении некоторых видов спектроделителей используются «Свидетели»?
7. как изменяются спектральные зависимости коэффициентов отражения и пропускания при увеличении угла падения излучения на спектроделитель?

Основная литература

1. Путилин Э.С. Оптические покрытия 2010 год, СПб ГУИТМО 220с.
2. Гайнутдинов И.С., Несмелов Е.А., Михайлов А.В., Иванов В.П., Абзалова Г.И. Свойства и методы получения интерференционных покрытий для оптического приборостроения. Казань. Фэн 2003 423с.
3. Справочник оптика- технолога под ред. М.А. Окатова, Политехника, 2004, 679с

Дополнительная литература

1. Шрейдер Х. Осаждение окисных слоев из органических растворов. Физика тонких пленок. под ред. Г.Хасса и Р. Туна М.:Мир. 1970.
2. Фурман Ш.А. Тонкослойные оптические покрытия. 1977,- Л.:Машиностроение. С.264.
3. Телен А. Конструирование многослойных интерференционных покрытий //Физика тонких пленок/ Под ред. Г. Хасса и Э.Туна М: Мир V, 1972 Т.5
4. Фурман Ш.А. Тонкослойные оптические покрытия. 1977 Л: Машиностроение.

Лабораторная работа № 6

ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК УЗКОПОЛОСНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ

Цель работы – расчёт спектральных характеристик диэлектрического светофильтра с заданной структурой (количеством, показателями преломления, оптическими толщинами слоёв и порядком их расположения). Исследование влияния условий осаждения слоёв, составляющих диэлектрический светофильтр, на его спектральные характеристики. Диэлектрический светофильтр формируется термическим испарением в вакууме. Измерение спектральных характеристик диэлектрических светофильтров, полученных в результате выполнения работы. Сравнение расчётных и экспериментальных зависимостей пропускания светофильтров от длины волны. Исследование эффекта старения диэлектрических светофильтров (определение изменения положения длины волны максимального пропускания λ_{\max} , величины максимального пропускания T_{\max} и полуширины пропускания $2\delta\lambda$ во времени).

Теоретическая часть

Фильтрующие покрытия используются для выделения заданного спектрального интервала прошедшего или отражённого излучения из сплошного спектра падающего излучения. Особым типом фильтрующих покрытий являются узкополосные пропускающие (отражающие) светофильтры. Отличительной особенностью этих светофильтров является малое отношение полуширины пропускания ($2\delta\lambda$) к длине волны (λ_{\max}), на которой пропускание внутри интервала, соответствующего полуширине светофильтра имеет минимальное значение. Величина отношения $\delta\lambda/\lambda_{\max}$ лежит в интервале от 10^{-3} до 10^{-2} . Узкополосные пропускающие интерференционные фильтры (УПИФ) обладают высоким пропусканием в максимуме (60-90)%, высокой контрастностью, т.е. отношением пропускания в максимуме к пропусканию в нерабочем спектральном диапазоне, малой полушириной (интервал длин волн, в которых пропускание больше или равно 0,5 максимального пропускания), незначительной массой (1-200г). С помощью УПИФ можно выделить спектральные интервалы различной ширины, начиная с десятков нанометров и кончая полосами порядка 0,5 нм.

Светофильтры (УПИФ) с высоким коэффициентом пропускания в максимуме работают как многолучевой интерферометр со сравнительно небольшой разностью хода (в несколько длин волн). Обычно светофильтры изготавливают следующим образом. На стеклянную (или

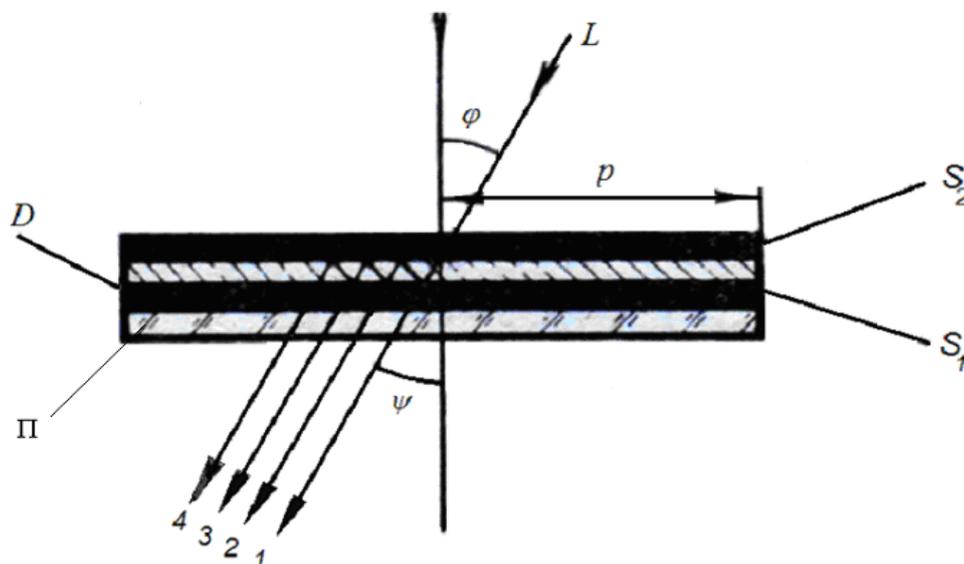


Рис. 6. 1. Схема интерференционного светофильтра.

какую-нибудь другую) прозрачную подложку (П) наносят путем испарения в вакууме последовательно зеркало S_1 , прозрачный разделительный слой D и второе зеркало S_2 . Зеркала S_1 и S_2 могут быть как металлическими, так и многослойными диэлектрическими.

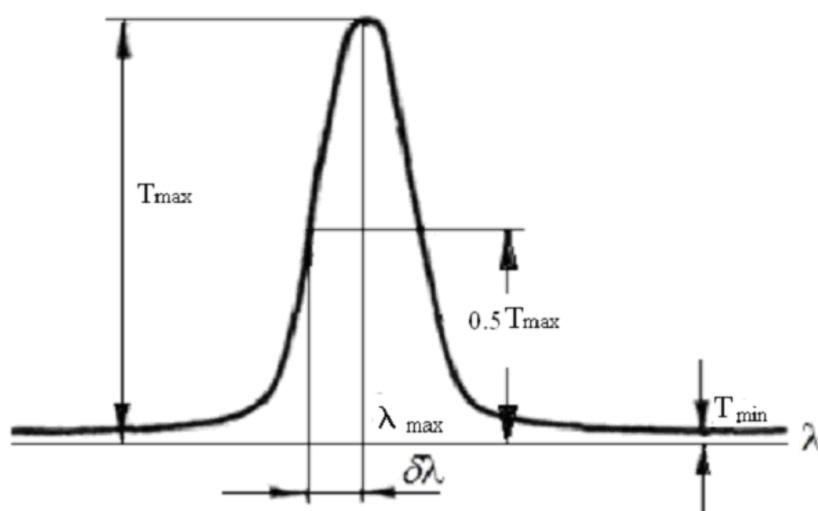


Рис. 6.2 Типичное распределение пропускания по спектру интерференционного светофильтра.

Рассмотрим распространение излучения в светофильтре. На рис. 6.1 показан ход лучей в светофильтре. Излучение падает в систему под

некоторым углом φ , выходит из системы под углом ψ . Падающий на такую систему луч света L испытывает в ней многократное отражение. Пропускание излучения светофильтром T определяется следующей зависимостью:

$$T = \frac{T_1 T_2}{1 + R_1 R_2 - 2(R_1 R_2)^{1/2} \cos 2\Phi}, \quad (6.1)$$

где T_1, T_2, R_1, R_2 - соответственно энергетические коэффициенты пропускания и отражения первого S_1 и второго S_2 зеркал,

$\Phi = 2\pi \frac{nd}{\lambda} \cos \theta + \rho_1 + \rho_2$ - фазовая толщина разделительного слоя d ,

n, d - показатель преломления и геометрическая толщина материала разделительного слоя D , который будем считать абсолютно прозрачным.

λ - длина волны, на которой измеряется пропускание.

ρ_1, ρ_2 - разность фаз между падающей и отраженной волнами соответственно на первом и втором зеркалах на длине волны λ ,

θ - угол распространения света в разделительном слое $n \sin \theta = n_0 \sin \varphi$

При $\cos 2\Phi = 1, 2\Phi = 2k\pi$, где k - порядок интерференции (любое целое число). Пропускание системы максимально и равно:

$$T_{\max} = \frac{T_1 T_2}{[1 - (R_1 \times R_2)^{1/2}]^2} \quad (6.2)$$

При $\cos 2\Phi = -1, 2\Phi = (2k+1)\pi$, где k - порядок интерференции (любое целое число). Пропускание системы минимально и равно:

$$T_{\min} = \frac{T_1 T_2}{[1 + (R_1 \times R_2)^{1/2}]^2} \quad (6.2a)$$

Длина волны, соответствующая максимальному пропусканию, равна:

$$\lambda_{\max} = \frac{2nd \cos \theta}{k - \frac{\rho_1 + \rho_2}{2\pi}} = \frac{2nd \cos \theta}{k - \frac{1}{2\pi}(\rho_1 + \rho_2)}$$

Типичная спектральная характеристика интерференционного фильтра приведена на рис.6.2.

Основными характеристиками светофильтра являются:

- длина волны λ_{\max} , которая соответствует максимальному пропусканию,

- пропускание в максимуме T_{\max} ,

- пропускание в минимуме T_{\min} или T_{ϕ} , т.е. пропускание в фоне,

- ширина полосы пропускания $2\delta\lambda$, определяемая величиной $2\delta\lambda = 2$

$|\lambda_{0,5T_{\max}} - \lambda_{\max}|$, где $\lambda_{0,5T_{\max}}$ длина волны, при которой $T = 1/2 T_{\max}$,

- контрастность светофильтра, определяемая, как отношение T_{\max}/T_{\min} ,

- апертура светофильтра, представляющая собой угловой раствор конуса лучей, при котором монохроматичность светофильтра заметно не ухудшается в зависимости от угла падения светового пучка.

Найдем полосу пропускания, ограниченную длинами волн, на которых $T=0,5T_{\max}$, пропускание в этих длинах волн определяется согласно (1):

$$\frac{T_1 T_2}{1 + R_1 R_2 - 2(R_1 R_2)^{1/2} \cos 2\Phi} = \frac{1}{2} \frac{T_1 T_2}{[1 - (R_1 R_2)^{1/2}]^2} \quad (6.3)$$

здесь $2\Phi = 2\pi + \alpha$, где α - некоторая неизвестная величина, соответствующая отступлению по спектру на величину $\delta\lambda$, $\delta\lambda$ - полуширина полосы пропускания

$$2\Phi = 2\pi + \alpha = \frac{4\pi nd}{\lambda_{\max} + \delta\lambda} + \rho_1 + \rho_2 \quad (6.4)$$

Поскольку $\cos(2\pi + \alpha) = \cos \alpha$; и $\cos \alpha = \sqrt{1 - \sin^2 \alpha}$, то ввиду малости угла α можно записать $\cos \alpha = 1 - 0,5\alpha^2$.

Определим величину Φ , соответствующую длине волны $\lambda_{\max} + \delta\lambda$

$$\Phi = \frac{2\pi nd}{\lambda_{\max} \left(1 + \frac{\delta\lambda}{\lambda_{\max}}\right)} + \rho'_1 + \rho'_2 = \frac{2\pi nd}{\lambda_{\max}} \left(1 - \frac{\delta\lambda}{\lambda_{\max}}\right) + \rho'_1 + \rho'_2 \quad (6.5)$$

ρ'_1 и ρ'_2 - разность фаз между падающей и отраженной от зеркала волнами на длине волны $\lambda_{\max} + \delta\lambda$.

Найдем величину α , сравнив фазовые толщины разделительного слоя, при которых $T = T_{\max}$, $T=0,5T_{\max}$, $\alpha = \pi + \alpha - \pi$, в предположении, что разности фаз, соответствующие длинам волн λ_{\max} и $\lambda_{\max} + \delta\lambda$ у зеркал, образующих интерференционный светофильтр, приблизительно одинаковы:

$$\begin{aligned} \frac{2\pi nd}{\lambda_{\max}} \left(1 - \frac{\delta\lambda}{\lambda_{\max}}\right) + \rho'_1 + \rho'_2 - \left(\frac{2\pi nd}{\lambda_{\max}} + \rho_1 + \rho_2\right) &= \frac{2\pi nd}{\lambda_{\max}} \left(-\frac{\delta\lambda}{\lambda_{\max}}\right) + \\ + 2 \frac{\partial \rho_{\delta\lambda}}{\partial \lambda} &= \left(-\frac{2\pi nd}{\lambda_{\max}^2} + 2 \frac{\partial \rho}{\partial \rho}\right) \delta\lambda = \left(-\frac{2\pi nd}{\lambda_{\max}} + 2\lambda_{\max} \frac{\partial \rho}{\partial \lambda}\right) \frac{\delta\lambda}{\lambda} \end{aligned} \quad (6.6)$$

подставляя (6.6) в (6.3), получим:

$$\frac{T_1 T_2}{2[1 - (R_1 R_2)]^2} = \frac{T_1 T_2}{[1 - (R_1 R_2)]^2 + (R_1 R_2)^{1/2} \left(\frac{2\pi nd}{\lambda_{\max}} + 2 \frac{\partial \rho}{\partial \lambda} \lambda_{\max}\right)^2 \left(\frac{\delta\lambda}{\lambda_{\max}}\right)^2} \quad (6.7)$$

Из (6.7) следует, что

$$(R_1 R_2)^{1/2} \left(\frac{2\pi n d}{\lambda_{\max}} + 2\lambda_{\max} \frac{\partial \rho}{\partial \lambda} \right)^2 \left(\frac{\delta \lambda}{\lambda_{\max}} \right)^2 = \left[1 - (R_1 R_2)^{1/2} \right]^2 \quad (6.8)$$

и относительная полуширина полосы пропускания фильтра $\frac{2\delta\lambda}{\lambda_{\max}}$ равна

$$\frac{2\delta\lambda}{\lambda_{\max}} = \frac{1}{-k + \frac{\partial \rho}{\partial \lambda} \lambda_{\max}} \cdot \frac{\left[1 - (R_1 R_2)^{1/2} \right]}{\pi \sqrt[4]{R_1 R_2}} \quad (6.9)$$

Контрастность фильтра равна $C = T_{\max}/T_{\min}$

$$\text{поскольку } T_{\max} = \frac{T_1 T_2}{\left[1 - (R_1 R_2)^{1/2} \right]^2} \text{ и } T_{\min} = \frac{T_1 T_2}{\left[1 + (R_1 R_2)^{1/2} \right]^2},$$

то

$$C = \frac{\left[1 + (R_1 R_2)^{1/2} \right]^2}{\left[1 - (R_1 R_2)^{1/2} \right]^2} \quad (6.10)$$

и контрастность светофильтра определяется только коэффициентами отражения зеркал.

Связь между апертурой светофильтра и его полушириной можно найти следующим образом. Пусть максимальное пропускание T_{\max} имеет место при нормальном падении, фазовая толщина слоя равна

$k\lambda_m - \frac{\lambda_m}{2\pi}(\rho_1 + \rho_2)$ а оптическая толщина $nd \cos \theta - (\rho'_1 + \rho'_2)$, разность между

этими толщинами $\frac{2\pi n d}{\lambda} - \frac{2\pi n d}{\lambda} \cos \theta$.

При нормальном падении $nd - (\rho_1 + \rho_2) \frac{\lambda}{2\pi} = k\lambda$

При наклонном падении $nd \cos \theta - (\rho'_1 + \rho'_2) \frac{\lambda}{2\pi} = k\lambda'$

если θ мало, $\rho'_1 = \rho_1$ $\rho'_2 = \rho_2$ $nd = k \frac{\lambda}{2}$

$nd(1 - \cos \theta) - \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{\partial \rho_1}{\partial \lambda} + \frac{\partial \rho_2}{\partial \lambda} \right) \delta \lambda = k \delta \lambda$

$$\cos \theta = \sqrt{1 - \left(\frac{n_0 \sin \varphi}{n} \right)^2} = 1 - \left(\frac{n_0 \sin \varphi}{n} \right)^2 = 1 - \left(\frac{n_0 \varphi}{n} \right)^2$$

тогда

$$\text{nd} \left(\frac{n_0 \varphi}{n} \right)^2 = 2 \left[k + \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{\partial \rho_1}{\partial \lambda} + \frac{\partial \rho_2}{\partial \lambda} \right) \right] \cdot \frac{\delta \lambda}{\lambda}; \left(\frac{n_0 \varphi}{n} \right)^2 = \left[1 - \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{\partial \rho_1}{\partial \lambda} + \frac{\partial \rho_2}{\partial \lambda} \right) \right] \frac{\delta \lambda}{\lambda_{\max}}$$

из-за малости величин $\frac{\partial \rho_1}{\partial \lambda}; \frac{\partial \rho_2}{\partial \lambda}$ ими можно пренебречь и для оценок можно

считать, что $\varphi = \frac{n}{n_0} \sqrt{\frac{2\delta\lambda}{\lambda}}$. φ представляет собой апертуру светофильтра при

ширине полосы пропускания $2\delta\lambda$.

Для точного контроля толщины слоя при изготовлении фильтров необходимо, чтобы величина $\Delta\lambda$, т.е. спектральный интервал, выделяемый на выходе монохроматора, не превышал $0,1(2\delta\lambda)$. При изготовлении светофильтров следует учитывать, что спектральный интервал $\Delta\lambda$ определяется по формуле:

$$\Delta\lambda = S \frac{d\lambda}{dl}$$

где S - ширина раскрываемой выходной щели монохроматора в мм,

$\frac{d\lambda}{dl}$ - обратная линейная дисперсия. В частности для монохроматора,

используемого в СФКТ-751В величина обратной линейной дисперсии $d\lambda/dl = 5,9$ нм/мм при длине волны 520 нм.

Содержание работы

2. Определить размер выходной щели монохроматора, при которой следует вести осаждение слоев, формирующих УПИФ, следующей конструкции ВНВ2НВНВ, на основе плёнкообразующих материалов с показателями преломления $n_H=1,38$, $n_B=2,20$, либо $n_H=1,45$, $n_B=1,96$ при $\lambda_0=520$ нм, спектральная характеристика такого фильтра приведена на рис.6.3 кривая 1 для материалов с $n_H=1,38$, и $n_B=2,20$, кривая 2 – для материалов $n_H=1,45$, $n_B=1,95$

3. Произвести изготовление указанного выше интерференционного светофильтра.

4. Измерить спектральную характеристику энергетического коэффициента пропускания полученного фильтра на спектрофотометре СФ-26 или СФ-46 непосредственно после изготовления.

5. Определить размер выходной щели монохроматора, при которой следует вести осаждение слоев, формирующих УПИФ, следующей конструкции ВНВНВНВ4НВНВНВНВ, Произвести изготовление указанного выше фильтра на основе плёнкообразующих материалов с показателями преломления $n_H=1,38$, $n_B=2,20$, либо $n_H=1,45$, $n_B=1,96$ при $\lambda_0=520$ нм, спектральная характеристика такого фильтра приведена на

рис.6.4 кривая 1 для материалов с $n_n=1,38$, и $n_b=2,20$, кривая 2 – для материалов $n_n=1,45$, $n_b=1,95$

6. Произвести изготовление указанного выше фильтра.
7. Измерить спектральную характеристику энергетического коэффициента пропускания полученного фильтра на спектрофотометре СФ-26 или СФ-46 непосредственно после изготовления
8. Измерить спектральную характеристику энергетического коэффициента пропускания первого и второго полученных интерференционных светофильтров через 2 недели на спектрофотометре СФ26 или СФ-46.
9. Сравнить между собой экспериментально измеренные и расчётные спектральные характеристики энергетического коэффициента пропускания полученных фильтров, а так же величины: T_{max} , соответствующее максимальному пропусканию на длине волны λ_{max} , и величину полуширины $2\delta\lambda$) (см. рис.6.3, 6.4).
10. Сравнить между собой экспериментально измеренные спектральные характеристики энергетического коэффициента пропускания полученных фильтров, а так же величины: T_{max} , соответствующее максимальному пропусканию на длине волны λ_{max} , и величину полуширины $2\delta\lambda$) (см. рис.6.3, 6.4) сразу после изготовления и через две недели.

Методические указания и порядок выполнения работы

Произвести осаждение слоев, формирующих интерференционный светофильтр, согласно методике, изложенной в приложении. Работа выполняется с использованием метода термического испарения плёнообразующих материалов в вакууме.

Оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Структуру интерференционных светофильтров.
2. Изменение отсчетов СФКТ- 751В при осаждении слоев формируемого интерференционного светофильтра.
3. Сравнить значения отсчётов на СФКТ-751В соответствующие расчетным и экспериментальным значениям при формировании слоёв. Оценить величину возможной ошибки в оптической толщине сформированных слоёв.
4. Спектральные характеристики энергетического коэффициента пропускания интерференционных светофильтров, измеренные на СФ-26 или СФ-46, непосредственно после изготовления.
5. Спектральные характеристики энергетического коэффициента пропускания интерференционных светофильтров, измеренные на СФ-26 или СФ-46, через 2 недели после изготовления.

6. Сравнить спектральные характеристики энергетического коэффициента пропускания интерференционных светофильтров, измеренные на СФ-26 или СФ-46, непосредственно после изготовления и через 2 недели.
7. Определить величины: T_{\max} , соответствующее максимальному пропусканию на длине волны λ_{\max} , и величину полуширины $2\delta\lambda$ сразу после изготовления и через две недели.
8. Рассчитанный ход изменения энергетического коэффициента пропускания по мере осаждения интерференционного светофильтра на длине волны 520нм, соответствующей максимальному пропусканию.
9. Выводы о проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Виды УПИФ.
2. Характеристики УПИФ.
3. Факторы, влияющие на спектральные характеристики УПИФ.
4. Область применения УПИФ.
5. Отличие спектральных кривых диэлектрических светофильтров от металлодиэлектрических
6. Определение полуширины интерференционного светофильтра.
7. Что определяет контрастность интерференционного светофильтра.
8. Что определяет максимальное пропускание интерференционного светофильтра.
9. От чего зависит величина минимального пропускания интерференционного светофильтра.

Основная литература

1. Путилин Э.С. Оптические покрытия 2010год, СПб ГУИТМО 220с.
2. Гайнутдинов И.С., Несмелов Е.А., Михайлов А.В., Иванов В.П., Абзалова Г.И. Свойства и методы получения интерференционных покрытий для оптического приборостроения. Казань. Фэн 2003 423с.
3. Справочник оптика- технолога под ред. М.А. Окатова, Политехника, 2004, 679с

Дополнительная литература

1. Ш.А. Фурман Тонкослойные оптические покрытия. Л., Машиностроение, 1977.
2. Королёв Ф. А. Теоретическая оптика М. Высшая школа , 1966, 555С.

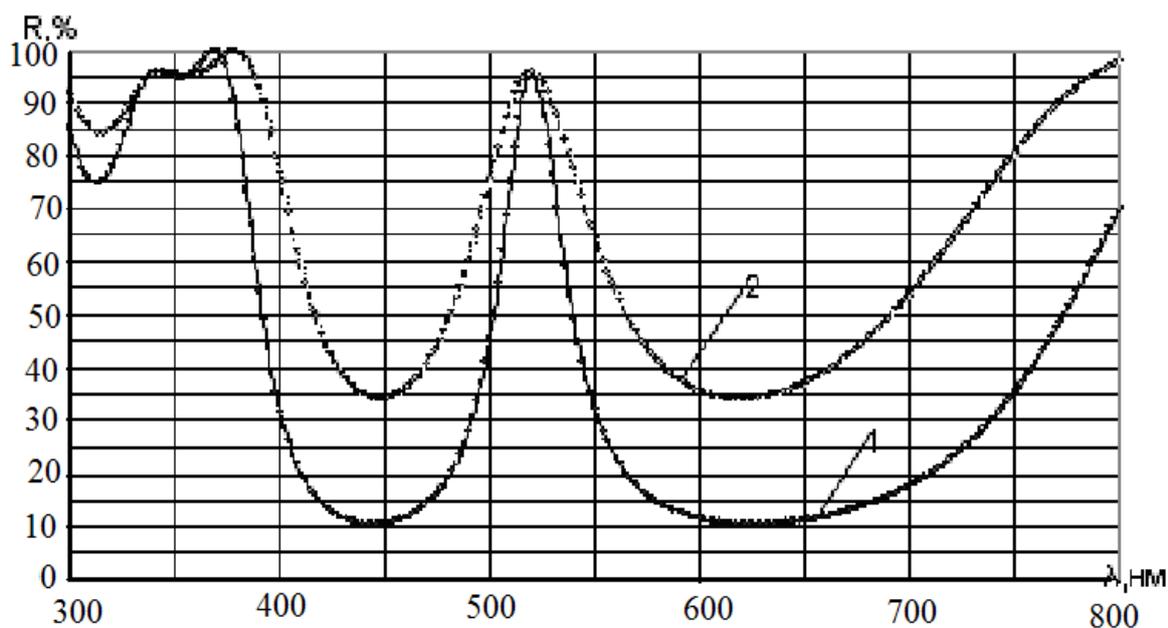


Рис. 6.3 Спектральная характеристика фильтра конструкции VNB2H VNB, на основе материалов с показателями преломления $n_H=1,38$, $n_B=2,20$, и на основе материалов $n_H=1,45$, $n_B=1,96$ при $\lambda_0=520$ нм, кривая 1 для материалов с $n_H=1,38$, и $n_B=2,20$, кривая 2 – для материалов $n_H=1,45$, $n_B=1,95$.

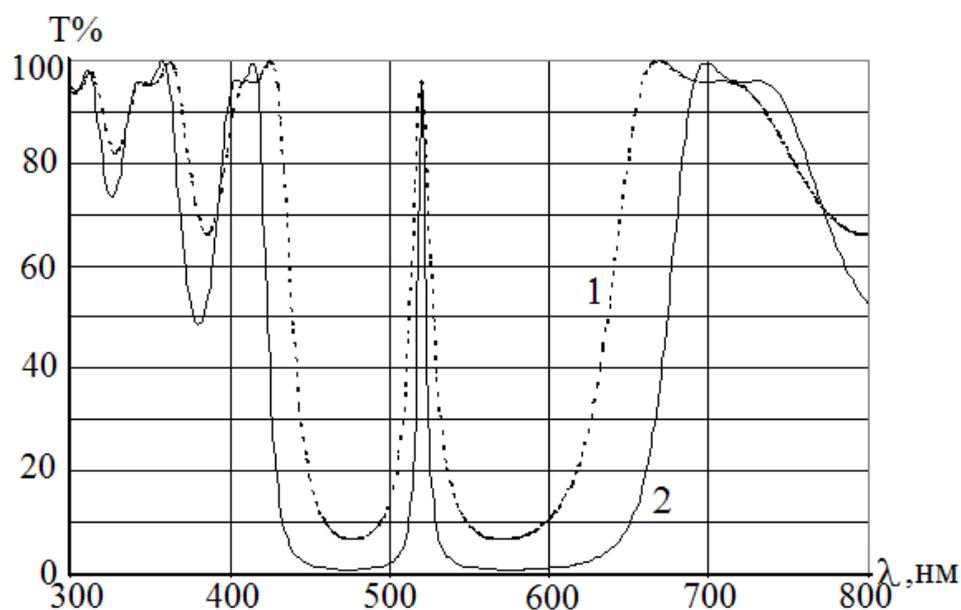


Рис. 6.4 Спектральная характеристика фильтра конструкции VNBVNBV2NBVNBVNBV, на основе материалов с показателями преломления $n_H=1,38$, $n_B=2,20$, и на основе материалов $n_H=1,45$, $n_B=1,96$ при $\lambda_0=520$ нм, кривая 1 для материалов с $n_H=1,38$, и $n_B=2,20$, кривая 2 – для материалов $n_H=1,45$, $n_B=1,95$, $n_m=1,52$.

Заключение

За последнее десятилетие в оптике тонких пленок сформировалось и успешно развивается новое направление — создание интерференционных покрытий с заданными характеристиками.

В области создания интерференционных покрытий с заданными оптическими свойствами можно выделить ряд тенденций.

- Заметный прогресс в теории синтеза интерференционных покрытий, позволяющей определять оптимальные параметры тонкопленочных систем, обеспечивающих наилучшее приближение к заданным оптическим свойствам. Теория синтеза интерференционных покрытий достигла такого уровня, когда на ее основе стало возможным решение многих сложных и важных прикладных задач. Сейчас уже наметилась тенденция применения синтеза в инженерной практике в широком масштабе, чему способствует быстрое действие и сравнительная лёгкость пользования вычислительной техники. Это обусловлено тем обстоятельством, что на основе теории синтеза многократно ускоряется поиск новых типов интерференционных покрытий. Более того, во многих случаях эмпирическим путем вообще не удастся сконструировать тонкопленочную систему с заданными оптическими свойствами.

- Стремление активно воздействовать на тонкослойную систему при ее реализации, т. е. формирование заданных оптических свойств в процессе нанесения интерференционного покрытия. Все большее внимание и признание находят оптимальные способы формирования системы, которые позволяют получать у реальных покрытий оптические свойства, близкие к требуемым, независимо от характера отступления параметров слоев от расчетных значений, неизбежно возникающих при изготовлении. С этой целью постоянно разрабатываются и совершенствуются системы контроля в процессе формирования покрытий, в состав ряда вакуумных установок, предназначенных для изготовления тонких плёнок термическим испарением в вакууме, вводится автоматизированный контроль, который позволяет устранить ошибки операторов, использование так называемого «двойного» контроля, когда система снабжается двумя автономными видами слежения за ростом плёнки в процессе её формирования, позволяет устранять ошибки контроля, свойственные каждой схеме.

- На современном этапе особую актуальность приобрела проблема строгой стабилизации во времени оптических свойств тонкослойных покрытий. Уровень стабильности используемых интерференционных покрытий определяет эффективность и долговечность многих прецизионных оптических приборов. В связи с этим большое число работ посвящается исследованию механизма, определяющего

изменения оптических характеристик интерференционных покрытий во времени, т. е. старению, и условиям, обеспечивающем их строгую стабилизацию.

Показано, что основные изменения во времени оптических характеристик интерференционных покрытий определяются процессами сорбции и десорбции влаги из атмосферы. Механизм старения обусловлен в основном порами слоев и является общим для тонкопленочных систем независимо от их химического состава. Поэтому особого внимания заслуживают исследования условий и механизма образования беспористых покрытий, например, путем нанесения пленок в электрическом поле. Создание покрытий, не обладающих порами, позволяет оградить их от возможности изменения характеристик.

- Развитие нового метода, обеспечивающего достижение заданной топографии оптических характеристик интерференционного покрытия путем корректировки потока пара плёнкообразующего материала. Это гибкий способ, позволяет изменять распределение конденсата на подложке в процессе нанесения покрытия

- Значительное внимание уделяется изучению влияния температуры на оптические свойства различных типов интерференционных покрытий и особенно узкополосных фильтров.

К проблемам и задачам в области создания интерференционных покрытий с заданными характеристиками, можно отнести создание общей аналитической теории синтез покрытий, несвязанной ограничениями, налагаемыми на оптические толщины слоев.

Построение теории оптимального формирования заданных оптических свойств в процессе нанесения тонкослойной системы.

Разработку принципов построения покрытий, обладающих слабой зависимостью спектральных характеристик от угла падения.

Улучшение оптических свойств основных типов интерференционных покрытий. Например, создание ультраузкополосных фильтров низкого порядка с полушириной меньше 0,05 нм и пропусканием в максимуме более 50%; стабильных инфракрасных отрезающих фильтров с крутым фронтом, обладающих отражением (пропусканием) свыше 90% в области длин волн $\lambda > 10$ мкм и отражением (пропусканием) менее 0,2% в прилегающей к ней широкой коротковолновой зоне; стойких широкополосных металлодиэлектрических интерференционных зеркал с отражением более 98% в области 400—900 нм.

Создание метода, позволяющего прогнозировать изменение во времени оптических характеристик изготовлённых интерференционных покрытий.

Разработку методов формирования многослойных отражателей и отрезающих фильтров, обеспечивающих строгую фиксацию положения спектральной кривой.

Изучение и разработку условий формирования тонкопленочных систем, повышающих стойкость покрытий к излучению оптических квантовых генераторов.

Исследование состава атмосферы в процессе осаждения в вакууме веществ на подложке, а также состава и структуры реальных пленок, образующих многослойное интерференционное покрытие. Эти сведения позволят учитывать многие особенности, сопровождающие формирование тонкослойных покрытий с заданными свойствами.

Приложение

Методические указания и порядок выполнения работ на вакуумной установке ВУ-1А

1. Включить установку сетевым выключателем в блоке 8 шкафа ВУ-1А (см. рис. 6.1) поз.1.

2. Включить механический насос (тумблер 1, блок 2) стойка ВУ-1А (см. рис.6.2).

3. Включить термомпарный ВТ1-4 и магнитный блокировочный ВМБ1-2 вакуумметры (тумблеры 1 и 2) в блоке 1 стойка ВУ-1А (см. рис.6.3). Включение форвакуумного агрегата происходит в момент включения вакуумметра ВТ1-4.

4. Включить печку диффузионного насоса (тумблер 2, блок 2 (см. рис.6.2) , при этом должна загореться индикаторная лампа 3.

5. Подключить форвакуумный насос к диффузионному насосу (тумблер 4, блок 2 стойки ВУ-1А), при этом должна загореться индикаторная лампа 5.

6. Кнопкой 6, блок 2 стойка ВУ-1А произвести напуск воздуха в камеру. Во время напуска воздуха индикатор 7 имеет зеленую окраску, напуск воздуха автоматически прекращается при достижении давления в камере 10^5 Па. Прекращение напуска воздуха в камеру можно осуществить нажатием тумблера 8 блок 2 (см. рис. 6.2.).

7. Произвести подготовку вакуумной камеры к загрузке. Очистить внутреннюю поверхность камеры от пыли и частиц, ранее осаждаемых материалов с помощью пылесоса. Загрузить тигель и резистивные испарители пленкообразующим веществом.

8. Подготовить к напылению подложку, для чего следует промыть стеклянную деталь губкой с мылом проточной водой. Вымытую деталь насухо протереть салфеткой, затем стеклянную поверхность следует окончательно очистить с помощью ваты, смоченной в этиловом спирте. Деталь протереть чистой батистовой салфеткой. После просыхания на стеклянной поверхности при дыхании на нее обнаруживается однородный узор, если на полированной поверхности при дыхании на нее наблюдается рисунок, следует протереть деталь снова.

9. Разместить оптическую деталь в вакуумной камере, закрепив ее на подложкодержателе. Проверить надежность закрепления детали при вращении подложкодержателя. Деталь должна быть расположена так, чтобы световой поток от источника света СФКТ-751В проходил через контрольный образец при вращении стола.

Процесс формирования покрытий

10. Произвести предварительную откачку вакуумной камеры. Для этого необходимо закрыть дверь камеры с помощью прижимной ручки, отключить форвакуумный насос от диффузионного тумблером 4, блок 2 (см. рис. 2), подключить форвакуумный агрегат к вакуумной камере (тумблер 9, блок 2), при этом индикатор 10 имеет зеленую окраску.

11. В процессе откачки вакуумной камеры форвакуумным агрегатом контроль за давлением в камере осуществляется по вакуумметру ВТ1-4 при включенном I канале (блок 1, стойка ВУ-1А (см. рис. 6.3).

12. При давлении в камере не более 6 Па можно произвести ионную очистку в камере. Ионная очистка производится при вращающихся деталях.

12.1. Для включения вращения подколпачной арматуры тумблер 1 (блок 3 стойки ВУ-1А (см. рис.6.4) вращение арматуры поставить в положение "ВКЛ". Частота вращения контролируется по показаниям прибора 2 в блоке 3 стойки ВУ-1А рис.4. Регулировка частоты вращения осуществляется поворотом ручки регулятора 3 в той же стойке. Пуск арматуры производится только при крайнем левом (нулевом) положении ручки регулятора 3.

12.2. Во время ионизации вакуумная камера должна охлаждаться. Для охлаждения стенок вакуумной камеры в ее рубашку подается холодная вода. Для этого тумблер 11 блок 2 (см. рис. 6.2) стойки ВУ-1А следует установить в положение "охлаждение".

12.3. Тумблеры ток ионизации 1 и сеть 2 в блоке 4 (см. рис. 6.5) шкафа ВУ-1А установить в положение "ВКЛ". При этом загораются лампочки 3 и 4 в блоке 4 (см. рис. 6.5). Величина тока ионизации регулируется ручками "грубо" (5) и "точно" (6) и контролируется прибором 7 блок 4 (см. рис. 6.5) После окончания процесса ионизации ручки 5 и 6 вывести в крайнее левое положение, тумблеры 1 и 2 блок 4 (см. рис.6.5) установить в положение "откл".

13. После достижения в камере давления (2-4) Па согласно показателям вакуумметра ВТ1-4 (канал I) переключить форвакуумный агрегат с откачки рабочей камеры на откачку диффузионного насоса; для этого поставить тумблер 9 в положение "закрыт", затем тумблер 4 в положение "открыт" блок 2, стойка ВУ-1А (см. рис. 6.2), при этом индикатор 5 должен иметь зеленую окраску. После достижения в диффузионном насосе давления $2 \cdot 10^{-3}$ Па контроль давления в диффузионном насосе производится с помощью вакуумметра ВМБ1-2 при включенном канале I И (блок 1, стойка ВУ1-А (см. рис. 6.3), открыть высоковакуумный затвор тумблер, для этого перевести тумблер 12 в положение "откр", блок 2 стойки ВУ1-А (см. рис. 6.2), при этом должен загореться индикатор 13.

14. Для контроля толщины осаждаемой в процессе испарения пленки, включить устройство спектрофотометрического контроля СФКТ-751. Для чего необходимо выполнить следующие операции.

14.1. Включить комбинированный цифровой прибор Щ 4300 тумблером "сеть".

14.2. Подать напряжение на лампу, включив предварительно кнопку "сеть" на блоке УБПН-3, а затем рукоятками "выходное напряжение" установить напряжение (6 -7,5) В.

14.3. Включить тумблер "сеть" на блоке УБПН-1 высоковольтного выпрямителя, затем включить "высокое напряжение" на блоке питания фотоэлектронного умножителя УБПН-1, установить минимальное значение напряжения рукоятками "высокое напряжение".

14.4. Включить синхронный детектор тумблером "сеть".

14.5. Установите по шкале монохроматора длину волны и ширину щели монохроматора, проверить соответствие решетки монохроматора, цветного стекла и установленного ФЭУ выбранной длине волны.

14.7. Регулируя величину "высокое напряжение" на блоке УБПН-1 установить начальный отсчет.

15. Для работы с резистивным испарителем необходимо установить ручки 6 и 7 (блок 3 стойка ВУ1-А (см. рис. 6.4) в крайне левое нулевое положение, затем тумблер 4 установить в положение "вкл", при этом загорится индикатор 5 (блок 3 стойки ВУ1-А (см. рис. 6.4). Выбор резистивного испарителя производится включением соответствующих переключателей 8, 9 (блок 3 стойки ВУ1-А (см. рис. 4). "Испаритель I", "Испаритель II". Регулировка тока на резистивном испарителе производится при помощи поворота ручек 6 и 7. Величину тока резистивного испарителя показывает прибор 10. Включение резистивных испарителей контролируется световодами 11 или 12. Изменение величины тока на резистивный испаритель должно осуществляться достаточно плавно.

16. Открывание и закрывание заслонок резистивных испарителей производится установкой тумблера, расположенного в основании вакуумной камеры.

17. Для включения и регулировки температуры нагревателя подложки предназначена ручка 13 (блок 3 стойки ВУ1-А.). При включении нагрева подложек загорается индикатор 14 блок 3 стойки ВУ1-А (см. рис. 6.4). Температура в камере контролируется с помощью прибора "Нагрев подложки" 15 блок 3.

18. При достижении в вакуумной камере давления $(2-4) \cdot 10^{-3}$ Па вакуумметр ВМБ1-2 положение II включить стойку электронно-лучевого испарителя сетевым выключателем в блоке 7 стойки УЭЛИ (см. рис. 6.6).

19. Включить вентилятор охлаждения тетрода в стойке УЭЛИ (блок 7 рис. 6.7 поз.1), а также в стойке ВУ-1А тумблером 16 в блоке 3 (рис. 6.4) охлаждение испарителей в камере.

20. Провести испарение мишени электронно-лучевым нагревом.

20.1. Убедившись, что ручка регулировки управления величиной подаваемого на катод тока (3 и 4, блок 2 стойки УЭЛИ) находятся в крайнем левом положении (рис.6.8), включить тумблер 1, затем в блоке 3 стойки УЭЛИ (рис. 6.8) тумблер 2 установить в положение "очистка катода".

20.2. После того, как загорится индикатор 5 ("накал") увеличить ток накала до (6-8) А с помощью тумблеров 3 и 4 (блок 3 стойки УЭЛИ) при этом токе выдержать катод (1,5-2) мин. Затем этими же тумблерами уменьшить ток накала до 0.

20.3. Переместить тумблер 2, блок 3 стоки УЭЛИ (рис. 6.8) из положения "очистка катода" в положение "эмиссия". Клавишей 2 (блок 7 стойки УЭЛИ рис. 6.7) подать на катод напряжение 6 кВ. После того, как на стойке УЭЛИ в блоке 3 загорится индикатор 6 тумблером 3 начать медленную подачу тока на катод. При этом необходимо следить за положением пучка электронов на испаряемом веществе. При токе эмиссии не превышающем 20 μ А необходимо расположить пучок электронов в центре испаряемого вещества.

20.4. Увеличивая ток эмиссии следить за давлением в вакуумной камере. Увеличение необходимо проводить медленно, чтобы в процессе нагрева вещества давление в камере не возросло более 10^{-2} Па. Когда при постоянном токе эмиссии давление в камере начнет падать, открыть заслонку над испарителем. Регулятор положения заслонки находится на основании рабочей камеры.

20.5. По изменению отсчета на цифровом вольтметре произвести контроль толщины осажденного слоя. Прекращение испарения осуществляется закрытием заслонки, уменьшением до 0 тока эмиссии (тумблер 3, 4, блок 3 стойки УЭЛИ), выключением подачи высокого напряжения на катод (кнопка 3, блок 7 стойки УЭЛИ рис. 6.7).

20.6. По окончании процесса осаждения необходимо отключить стойку УЭЛИ в следующей последовательности: перевести тумблер 2 в положение "очистка катода", выключить тумблер 1 (блок 3 стойки УЭЛИ), выключить вентилятор охлаждения (тумблер 4 блок 7), выключить сетевой выключатель в стойке УЭЛИ, отключить охлаждение камеры (тумблер 11 блок 2) и испарителя (тумблер 15 блок 3) в стойке ВУ-1А.

21. Отключить систему СФКТ-1, для чего следует выполнить следующие операции:

21.1. Уменьшить выходное напряжение в блоке УБПН-3 до 0 В, выключить его (тумблер "сеть").

21.2. Выключить тумблер "высокое напряжение" на блоке УБПН-3 (тумблер "сеть"), выключить его.

21.3. Выключить синхронный детектор (тумблер "сеть").

21.4. Выключить комбинированный цифровой прибор Щ 4300 (тумблер "сеть").

22. После прекращения осаждения слоя через 20' закрыть высоковакуумный затвор (тумблер 12, блок 2 стойки ВУ-1А) и одновременно отключить печку диффузионного насоса (тумблер 2, блок 2 стойки ВУ-1А).

23. Через 30 мин после закрытия высоковакуумного затвора напустить воздух в камеру (тумблер 6, блок 2 стойки ВУ-1А), при этом должен загореться индикатор 7 (блок 2 стойки ВУ-1А).

24. Вынуть деталь из вакуумной камеры.

25. Повторить п.п. 10 и 11.

26. Переключить форвакуумный агрегат с откачки рабочей камеры на откачку диффузионного насоса: для этого поставить тумблер 9 в положение “закрыт”, затем тумблер 4 в положение “открыт” блок 2, стойка ВУ-1А (см. рис.6.2), при этом индикатор 5 должен иметь зеленую окраску. После достижения в диффузионном насосе давления $8 \cdot 10^{-3}$ Па перевести тумблер 4 в положение “откл.”

27. Выключить тумблерами 1 и 2 (рис.3 блок 1 стока ВУ-1А) вакуумметры ВМБ1-2 и ВТ1-4.

28. Выключить установку сетевым выключателем в блоке 8 шкаф ВУ-1А (см. рис.6.1 поз.1).

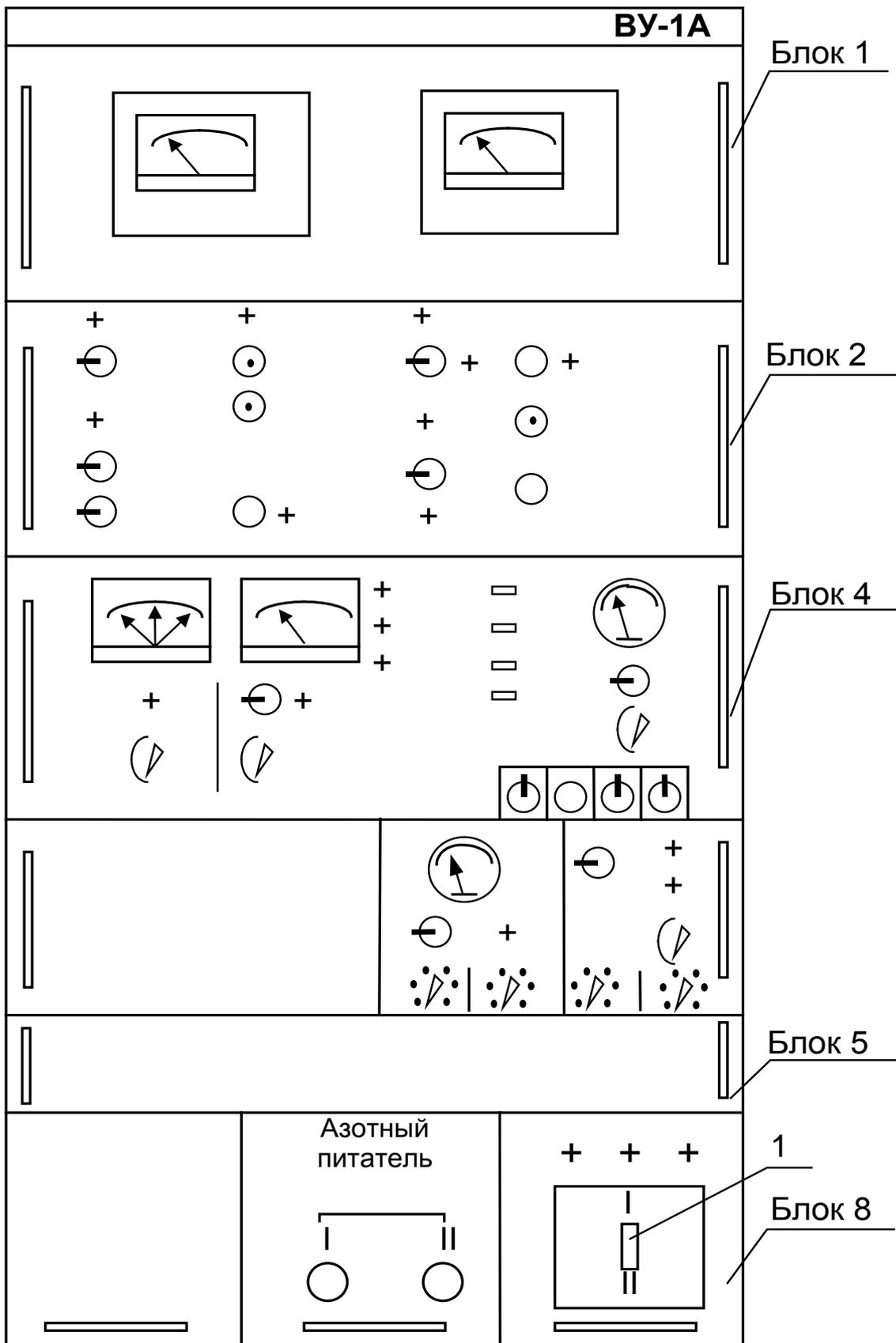


Рис. 6.1

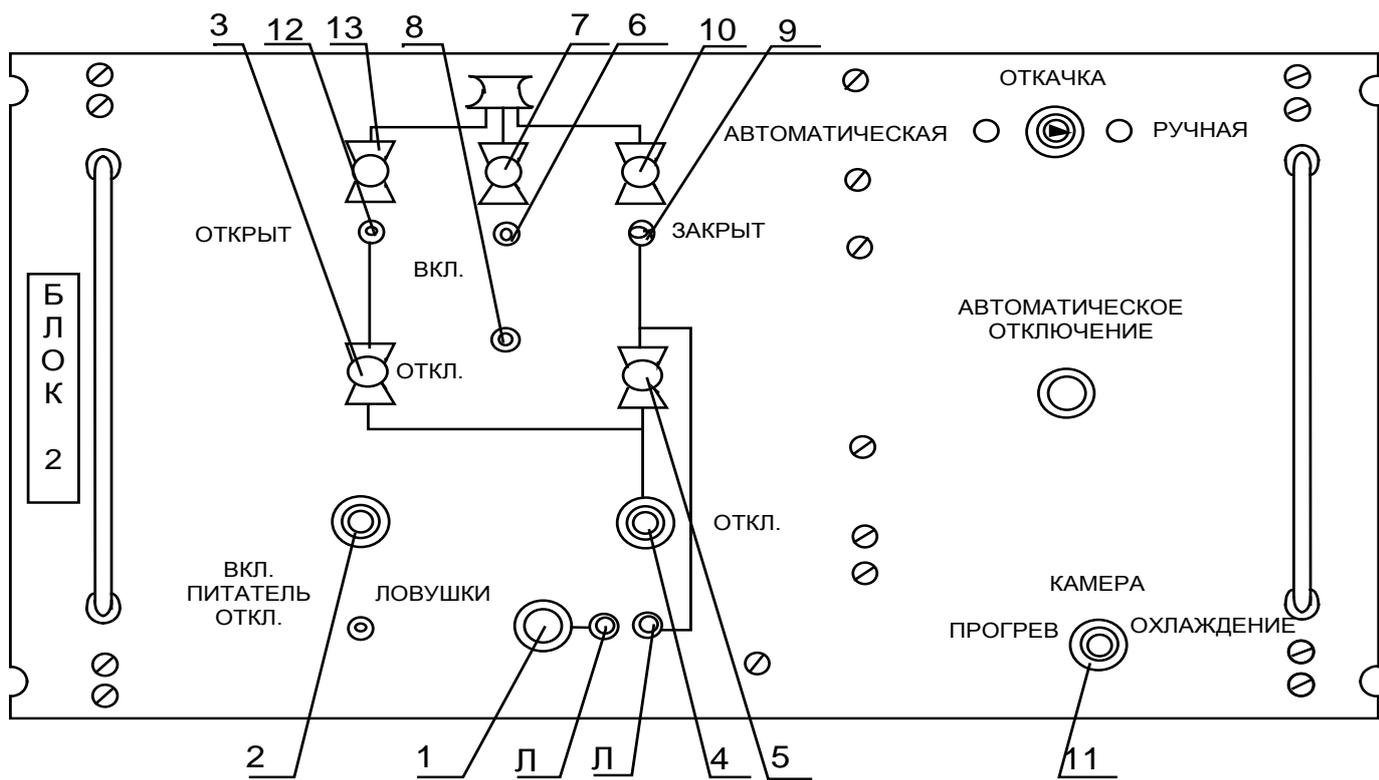


Рис.6.2

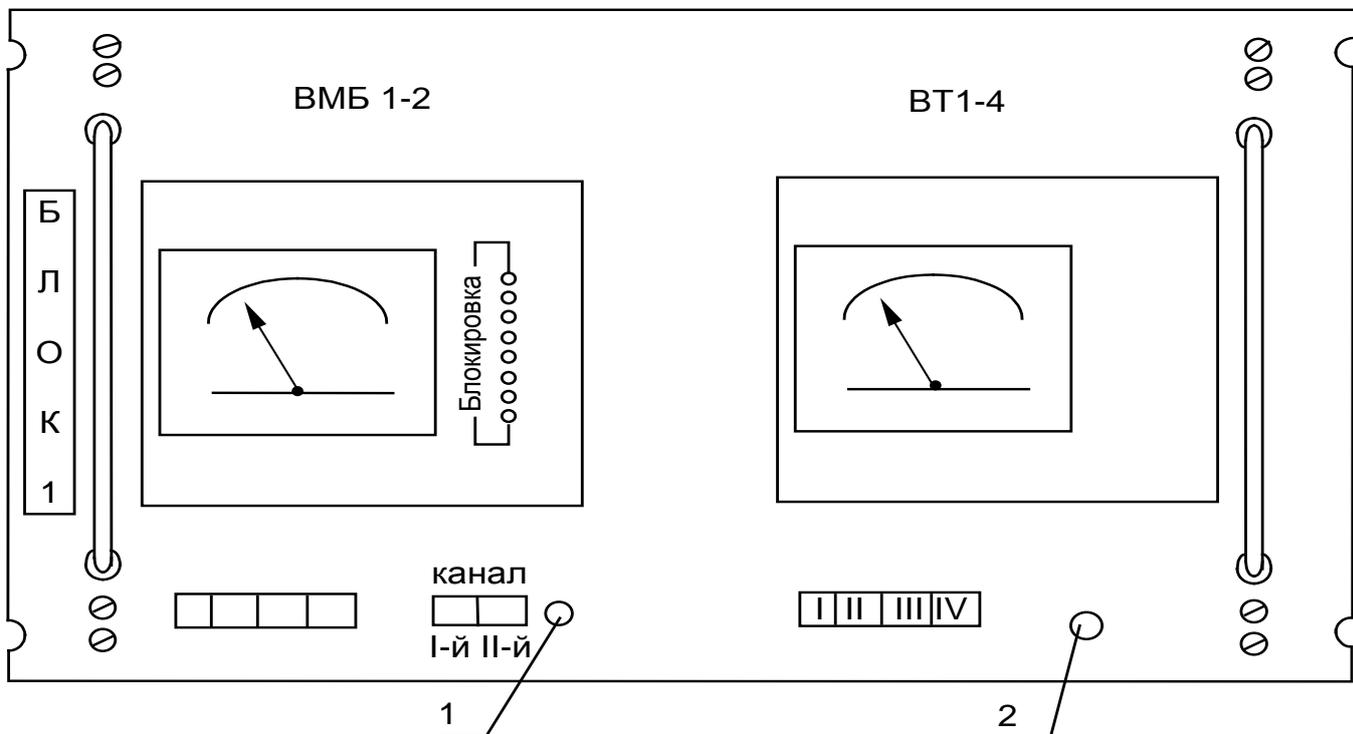


Рис. 6.3

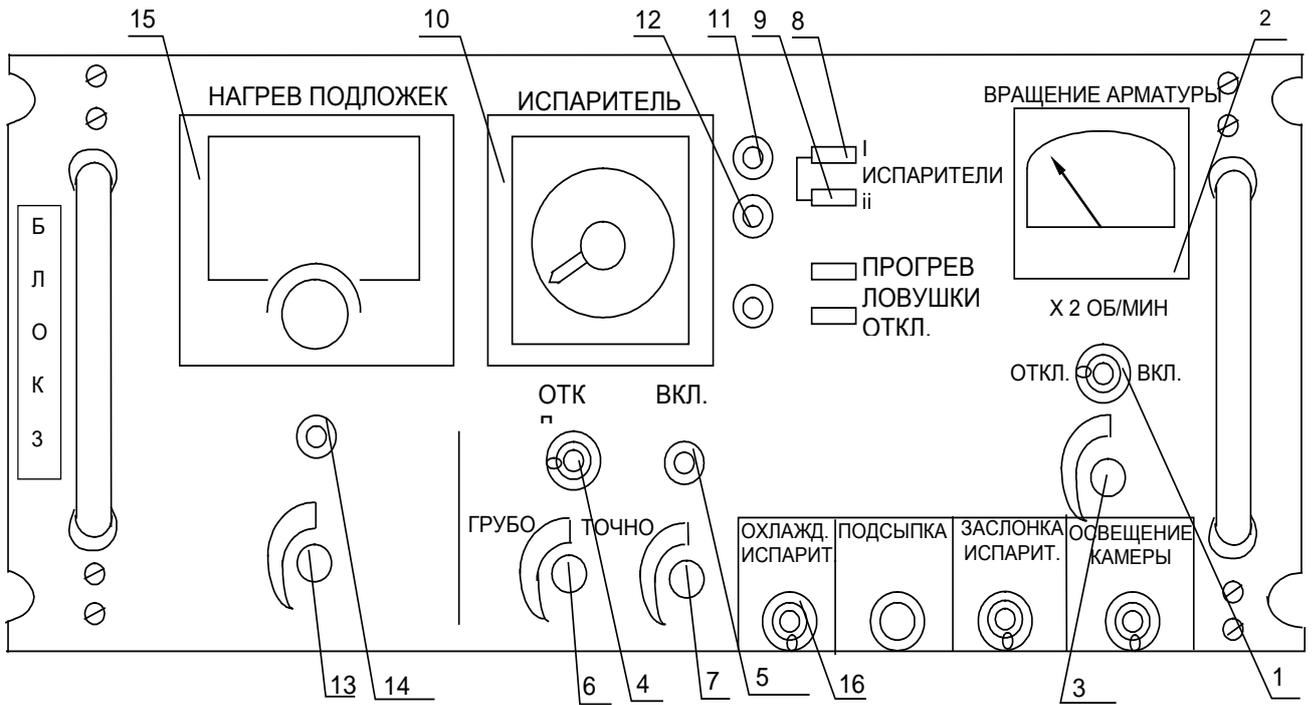


Рис. 6.4

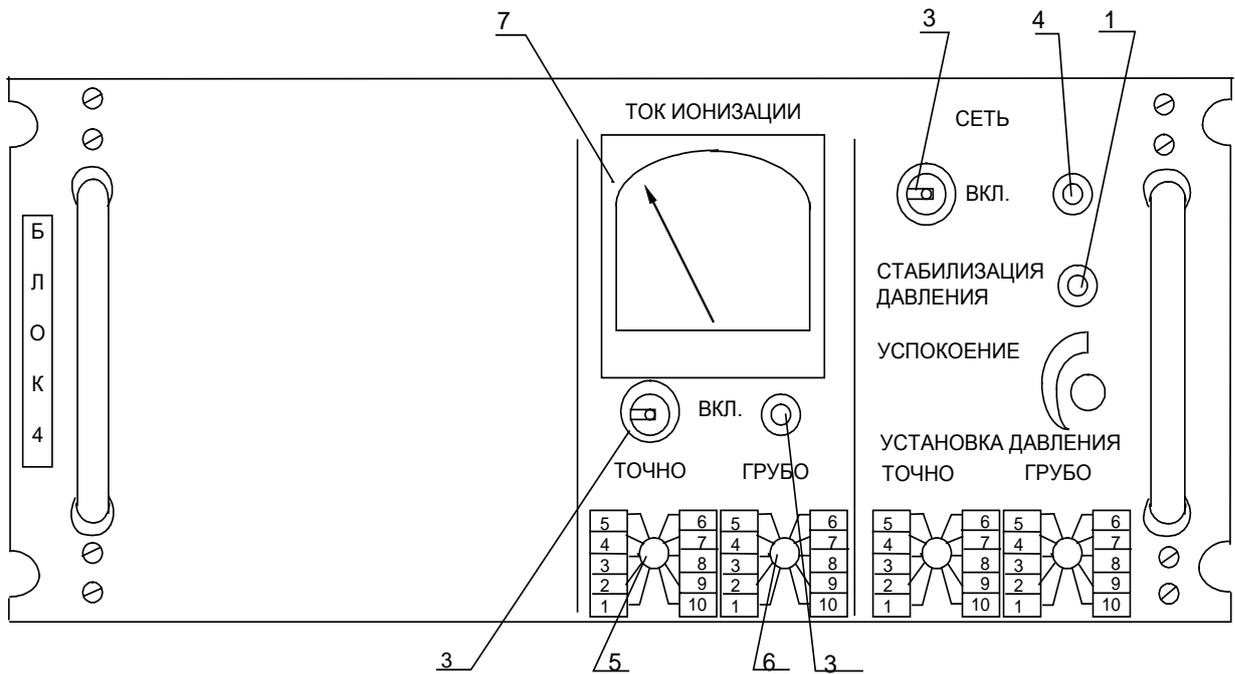


Рис. 6.5

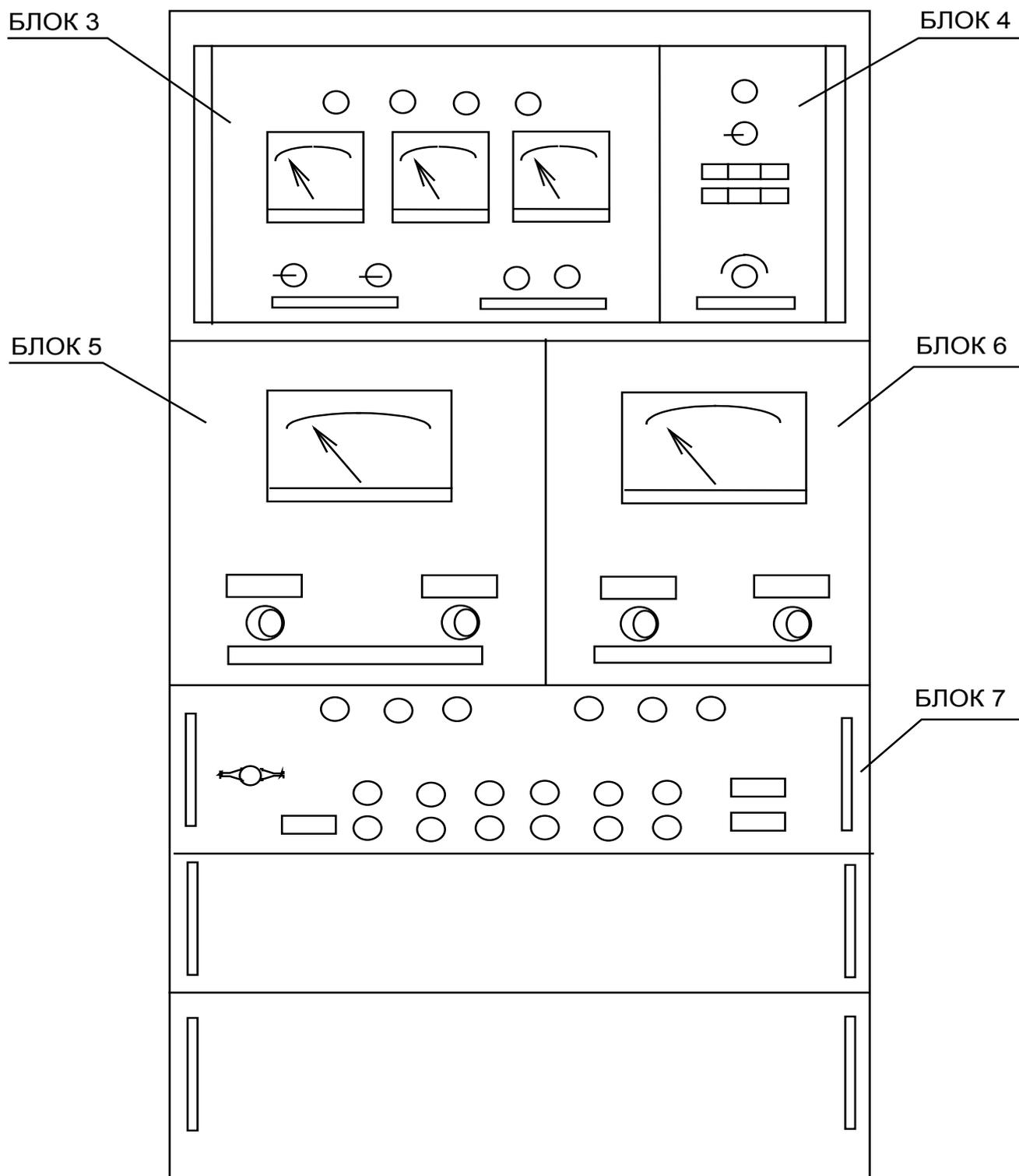


Рис.6.6

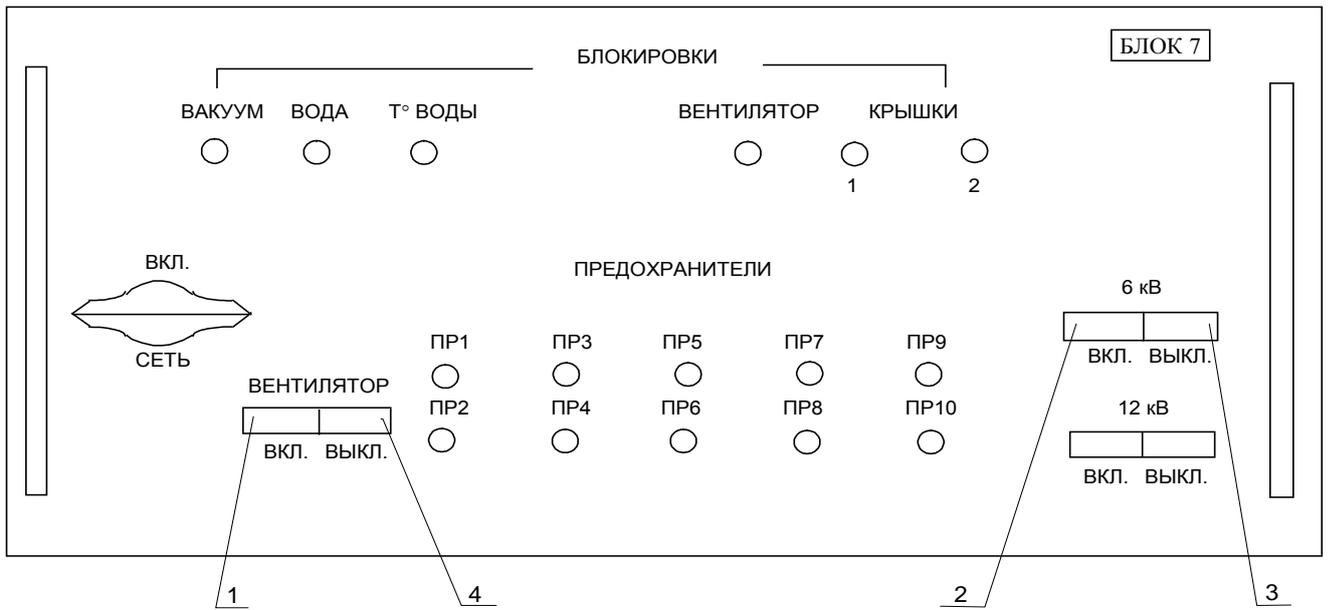


Рис. 6.7

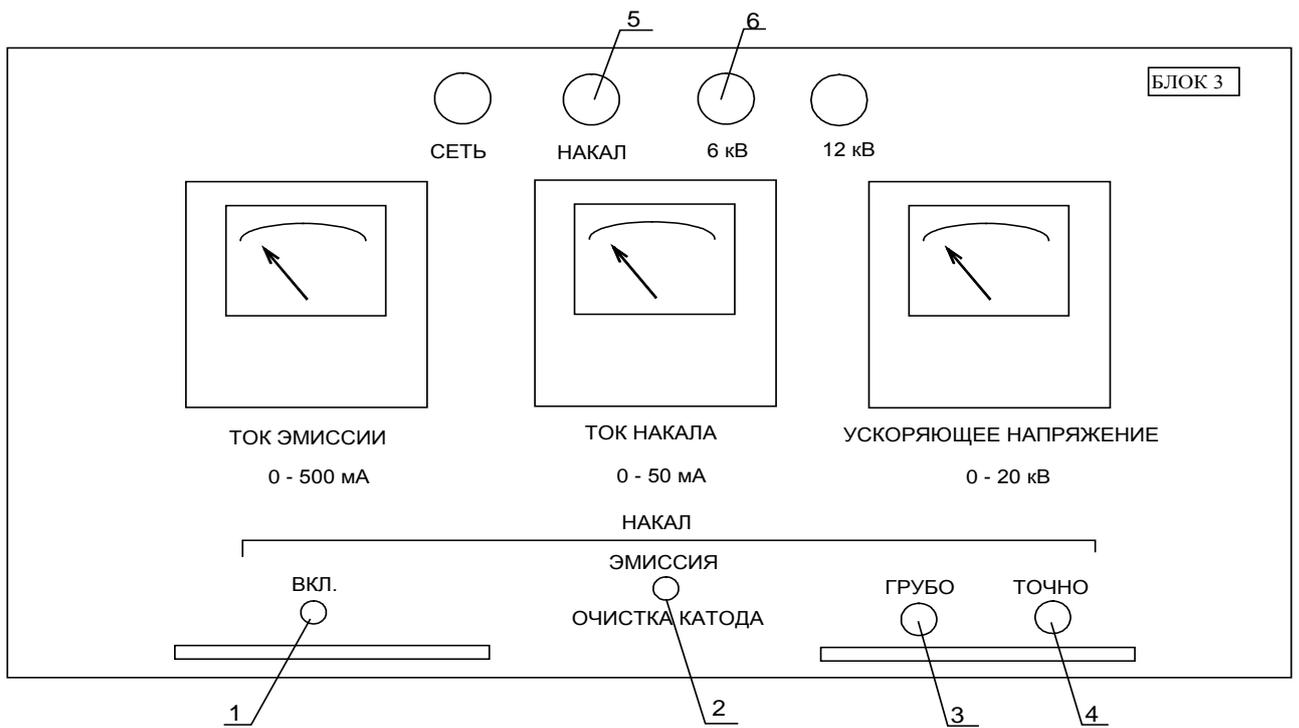


Рис.6.8



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена Программа развития государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики» на 2009–2018 годы.

КАФЕДРА ОПТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

В соответствии с приказом, Главного управления кадров промышленности Высшего Совета народного хозяйства СССР от 05.04.1930 N 12/87, образован Учебный комбинат точной механики и оптики. В состав комбината входил Ленинградский институт точной механики и оптики (ЛИТМО). В числе первых кафедр в 1932 году была образована кафедра технологии оптического стекла заведующий кафедрой - профессор Л.Г. Титов. Задачей кафедры была подготовка оптиков - технологов для развивающегося отечественного приборостроения. При кафедре была образована первая научно-исследовательская лаборатория (обработки оптического стекла), решавшая задачи создания отечественных оптических и обрабатываемых материалов. В тридцатые годы лекции по технологии оптического стекла читал член корреспондент АН СССР Н.Н. Качалов.

В 1975 воссоздана кафедра Технологии оптических деталей и покрытий. Её возглавил д.т.н., профессор Кузнецов Сергей Михайлович.

С 1988 года кафедру возглавляет д.т.н., профессор Путилин Эдуард Степанович.

Важным вкладом в фундаментальную оптику является создание и развитие научной школы по формированию волнового фронта излучения с помощью многослойных систем, участие в выполнении проекта UNIDO по созданию оптического производства в Сирийском национальном научно-исследовательском центре (Дамаск).

В научных лабораториях кафедры прошли обучение более 10 стажеров из вузов России и СНГ, ГДР, Китая, Кореи и Сирии, а также аспиранты из Болгарии, Кореи и Сирии.

За время существования кафедры подготовлено около 1000 инженеров оптиков-технологов, более 10 кандидатов наук, в том числе граждане Кореи, Болгарии, Израиля, Сирии, 2 доктора наук. С 1996 года кафедра переименована в кафедру Оптических технологий.

Кафедра проводит подготовку:

- бакалавров по направлению «Опготехника», срок обучения – 4 года.
- магистров по специальности «Опготехника», срок обучения – 6 лет.
- дипломированных специалистов по специальности «Оптические технологии и материалы», специализациям «оптические технологии» и «оптические покрытия». Срок обучения – 5,5 лет.

На кафедре обучаются аспиранты по специальности 05.11.07 «Оптико-электронные приборы и системы».

Для подготовки специалистов кафедра располагает учебно-производственными лабораториями:

- механической обработки оптических материалов,
- вакуумных методов изготовления оптических покрытий,
- методов и средств контроля параметров оптических элементов и покрытий.

На кафедре имеются учебные лаборатории, позволяющие закрепить практические навыки по курсам дисциплин, читаемых преподавателями кафедры в рамках учебных планов специальностей: Лазерная техника и лазерная технология, Оптико-электронные приборы и системы и Оптические технологии и материалы.

Преподаватели кафедры:

Профессоры - Путилин Эдуард Степанович; Губанова Людмила Александровна,

Доценты: Лисицын Юрий Васильевич, Нужин Андрей Владимирович, Карасёв Никита Николаевич, Рудин Ярослав Вадимович, Черезова Людмила Адамовна; старший преподаватель - Погумирский Максим Викторович, ассистенты: Каряев Константин Викторович,

Людмила Александровна Губанова

ОПТИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ

Учебное пособие

В авторской редакции

Компьютерная верстка

Дизайн обложки

Зав.редакционно-изд. отделом

Лицензия [14ДН2 00408 от 0511.99](#)

Подписано к печати **1.11.12**

Заказ №726 Тираж 100экз

Отпечатано на ризографе ,

Л,А.Губанова

Н. П.Лемешевская

Н.Ф. Гусарова

Редакционно-издательский отдел
Санкт-Петербургского национального
исследовательского университета
информационных технологий, механики

и оптики
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

