

Л.А. Губанова

**ФОТОНИКА ПОВЕРХНОСТИ И ЕЁ
ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА**



**Санкт-Петербург
2022**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Л.А. Губанова
ФОТОНИКА ПОВЕРХНОСТИ И ЕЁ
ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ
ИТМО

по направлению подготовки 12.04.03 Фотоника и оптоинформатика
в качестве Учебно-методического пособия для реализации основных
профессиональных образовательных программ высшего образования
магистратуры

 УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург
2022

Губанова Л.А., Фотоника поверхности и её основные свойства – СПб: Университет ИТМО, 2022. – 68 с. Рецензент: Котликов Евгений Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, профессор, ГУАП кафедра физики.

В пособии рассматриваются материалы, связанные с границей раздела двух сред с неравными показателями преломления. Рассмотрены основные характеристики этой границы: форма, шероховатость, дефекты, расположение её относительно других преломляющих сред. Представлен анализ отклонения показателей преломления, характеризующих эти среды, и наличие дефектов в средах, таких как пузырность, свильность, неоднородность, двулучепреломление на характер распространения излучения в них. Представлены требования к таким поверхностям, оформленные с использованием Российских и международных стандартов. Показано влияние переходного и трещиноватого слоёв на поверхностях, изготовленных из разных оптических материалов, на распространение излучения в оптическом элементе и отражении от данной поверхности. Приведён анализ возможности изменения физико-химических характеристик этой поверхности. Рассмотрены возможности увеличения и уменьшения отражения от этой поверхности падающего излучения. Показано влияние наличия поглощения в этих средах на изменение интенсивности падающего и отражённого излучений.



Университет ИТМО – национальный исследовательский университет, ведущий вуз России в области информационных, фотонных и биохимических технологий. Альма-матер победителей международных соревнований по программированию – ICPC (единственный в мире семикратный чемпион), Google Code Jam, Facebook Hacker Cup, Яндекс.Алгоритм, Russian Code Cup, Topcoder Open и др. Приоритетные направления: IT, фотоника, робототехника, квантовые коммуникации, трансляционная медицина, Life Sciences, Art&Science, Science Communication. Входит в ТОП-100 по направлению «Автоматизация и управление» Шанхайского предметного рейтинга (ARWU) и занимает 74 место в мире в британском предметном рейтинге QS по компьютерным наукам (Computer Science and Information Systems). С 2013 по 2020 гг. – лидер Проекта 5–100.

© Университет ИТМО, 2022

© Губанова Л.А., 2022

Содержание

	Введение	4
1.	Требования к поверхности оптического элемента и материалам, из которого он изготовлен.	6
	Допустимое отклонение формы поверхности.....	9
	Определение вида погрешности.....	10
	Чистота поверхности	12
	Требования к параметрам оптических материалов.....	15
	Характеристики допуска на неоднородность и свиль.	18
	Допуски на форму поверхности.....	19
	Допуски на центрировку.....	23
2.	Методы формирования поверхности, являющейся границей раздела двух сред с разными показателями преломления.	26
	Строение шлифованной поверхности.....	30
	Сверхгладкие поверхности.	34
3.	Физические явления, происходящие на границе двух сред	37
	Интерференционные слои на поверхности оптического стекла.....	40
	Нормальное падение излучения на непоглощающий интерференционный слой.....	41
	Однослойные интерференционные покрытия при наклонном падении излучения.....	46
	Оптические характеристики интерференционного поглощающего слоя.....	55
	Двухслойные интерференционные оптические системы.....	61
	Литература	68

ВВЕДЕНИЕ

Фотоника — дисциплина, занимающаяся фундаментальными и прикладными аспектами работы с оптическими сигналами, а также созданием на их базе устройств различного назначения. Поверхность любого элемента, используемого для изменения направления передаваемой информации или для её передачи, является границей раздела двух сред с разными показателями преломления. Для рассмотрения процессов, происходящих на этой границе, необходима информация об основных параметрах оптических материалов, характеристиках поверхности и оптических явлениях, происходящие на этих поверхностях.

Учебное пособие содержит основные требования, предъявляемые к поверхности оптического элемента и материалам, из которого он изготовлен. В пособие приведены примеры оформления чертежей оптических деталей согласно государственным стандартам (ГОСТ 2.412-81) и международным (ISSO). Перечислены требования (отклонение показателя преломления, допустимая величина пузырей, свилей, двулучепреломления, однородности, поглощения) к материалам, из которых изготавливаются оптические элементы. Рассмотрены допуски, представленные в ГОСТе, на отклонение формы оптического элемента от заданной, показана методика установления наличия допустимых дефектов на ней, проанализированы допуски на взаимное расположение отражающих и преломляющих поверхностей элементов, используемых в приборах фотоники.

В пособии рассмотрены различные способы получения элементов фотоники с заданной шероховатостью. Показана возможность получения сверхгладких поверхностей, приведено сравнение получения оптических поверхностей классическим (механическим способом) и современными (ионная обработка, алмазное точение) способами. Приведена структура нарушенного слоя, показано его влияния на эксплуатационные свойства элементов, используемых в передающем тракте оптико-электронных систем и приборов.

В данном методическом указании уделено значительное внимание вопросам, связанным с физическими явлениями, происходящими на границе

двух сред. Показано, что для изменения физико-химических свойств этой поверхности на ней следует формировать интерференционные слои. С целью определения изменения оптических свойств этой поверхности рассмотрен матричный метод описания оптических свойств многослойных интерференционных систем, расположенных на полубесконечной среде. Проанализировано изменение свойств поверхности для случая, когда на ней расположен интерференционный непоглощающий слой, как при нормальном, так и при наклонном падении излучения. Показано влияние наличия поглощения в этом слое на спектральные характеристики коэффициента отражения и пропускания оптической поверхности. Помимо этого, в работе рассмотрены принципы уменьшения френелевского коэффициента отражения полированной поверхности за счёт формирования на ней просветляющих (антиотражающих) покрытий. В работе также рассмотрены двухслойные интерференционные слои, формирующие интерференционные покрытия. Показано их влияние на свойства поверхности деталей, используемых в приборах фотоники.

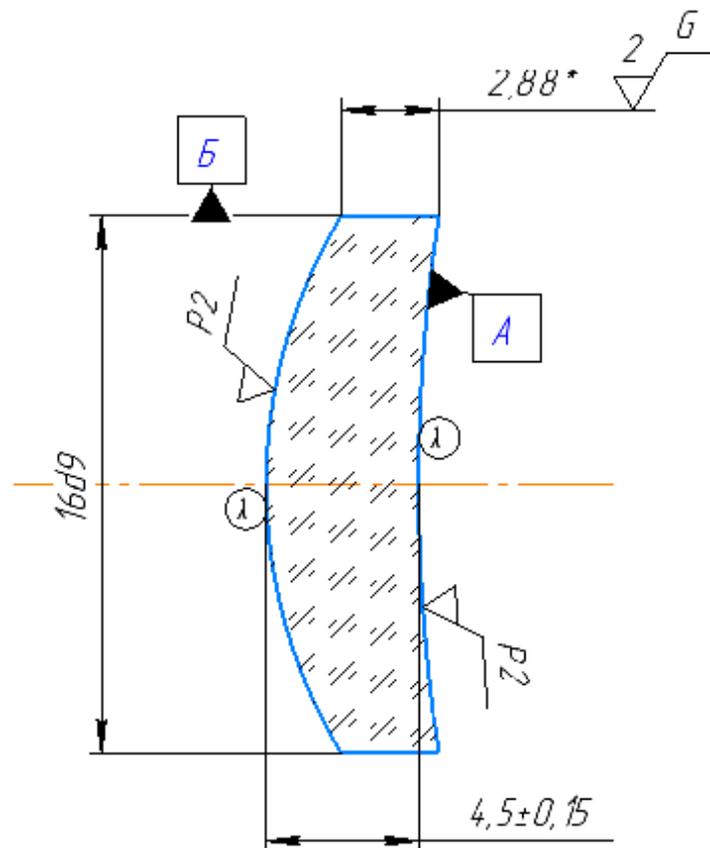
1. ТРЕБОВАНИЯ К ПОВЕРХНОСТИ ОПТИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА И МАТЕРИАЛАМ, ИЗ КОТОРОГО ОН ФОРМИРУЕТСЯ

При оформлении чертежей на оптические элементы (рис.1.1 и 1.2), формирующие систему передачи информации, указываются требования к основным характеристикам материала, из которого они изготавливаются, параметрам поверхностей и их взаимному расположению. [1-4]

При рассмотрении поверхности, на которую падает излучение, следует помнить об основных её характеристиках в случае, когда эта поверхность является отражающей или преломляющей для падающего излучения. Эти характеристики могут быть представлены в таблице, расположенной в правом верхнем углу чертежа, на котором изображён оптический элемент, что соответствует российскому стандарту (рис.1.1). Возможна ситуация, когда требования к этой поверхности представлены под чертежом оптического элемента. Этот вариант соответствует международному стандарту ISO (рис.1.2).

На чертежах в российском исполнении (ГОСТ 2.412-81) марка стекла записывается в штампе, расположенном внизу чертежа, в таблице, расположенной в правом верхнем углу, указываются требования к материалу, из которого изготовлен оптический элемент: класс и категории, устанавливающие допустимые отклонения показателя преломления от значения, указанного в ГОСТе на данную марку оптического стекла (n_e), класс и категории, устанавливающие допустимые отклонения коэффициента дисперсии от значения, указанного в ГОСТе на данную марку оптического стекла (Δn_{F-C}), класс и категория по однородности, категория материала по двулучепреломлению, категория стекла по ослаблению и класс и категория стекла по пузырьности.

Также на чертежах указываются требования к поверхности оптического элемента, каждая поверхность обозначается символом А, Б, В и т.п., эти символы указываются как индексы у регламентированных параметров.



Левая поверхность	Характеристика материала	Правая поверхность
<i>R 15,5 СХ</i> <i>∅ 15</i> <i>Защитная фаска 0,3</i> <i>Ⓛ</i> <i>AR 550 нм</i> <i>3/ 10(2)</i> <i>4/ 20'</i> <i>5/ 5 x 0,25</i> <i>6/ 8 kW/см2; 550nm</i>	<i>TK2</i> <i>n (546 нм) 1,574862±0,0001</i> <i>v -</i> <i>0/20</i> <i>1/ 5 x 0,25</i> <i>2/ 1; 1</i>	<i>R 53,3 СС</i> <i>∅ 15</i> <i>Защитная фаска 0,1</i> <i>Ⓛ</i> <i>AR 550 нм</i> <i>3/ 10(2)</i> <i>4/ 20'</i> <i>5/ 5 x 0,25</i> <i>6/ 8 kW/см2; 550nm</i>
<i>Обозначения в соответствии ISO 10110</i>		<i>Линза 5:1</i>

Рис.1.2 Чертёж оптического элемента в соответствии с международным стандартом ISSO.

Допустимое отклонение формы оптического элемента от заданной (N). Оно соответствует допустимому количеству интерференционных полос, которые наблюдаются при наложении контрольного стекла на контролируемую поверхность (рис.1.3), при контроле пробными стёклами. Если поверхность контролируется на интерферометре, то количество полос определяется по интерферограмме аттестуемой поверхности. Наличие местных дефектов (ΔN), определяющее зональные отклонения формы поверхности от заданной, определяется искажением интерференционных колец (полос) наблюдаемых при контроле поверхности (рис.1.4). Числовые показатели точности формы поверхности:

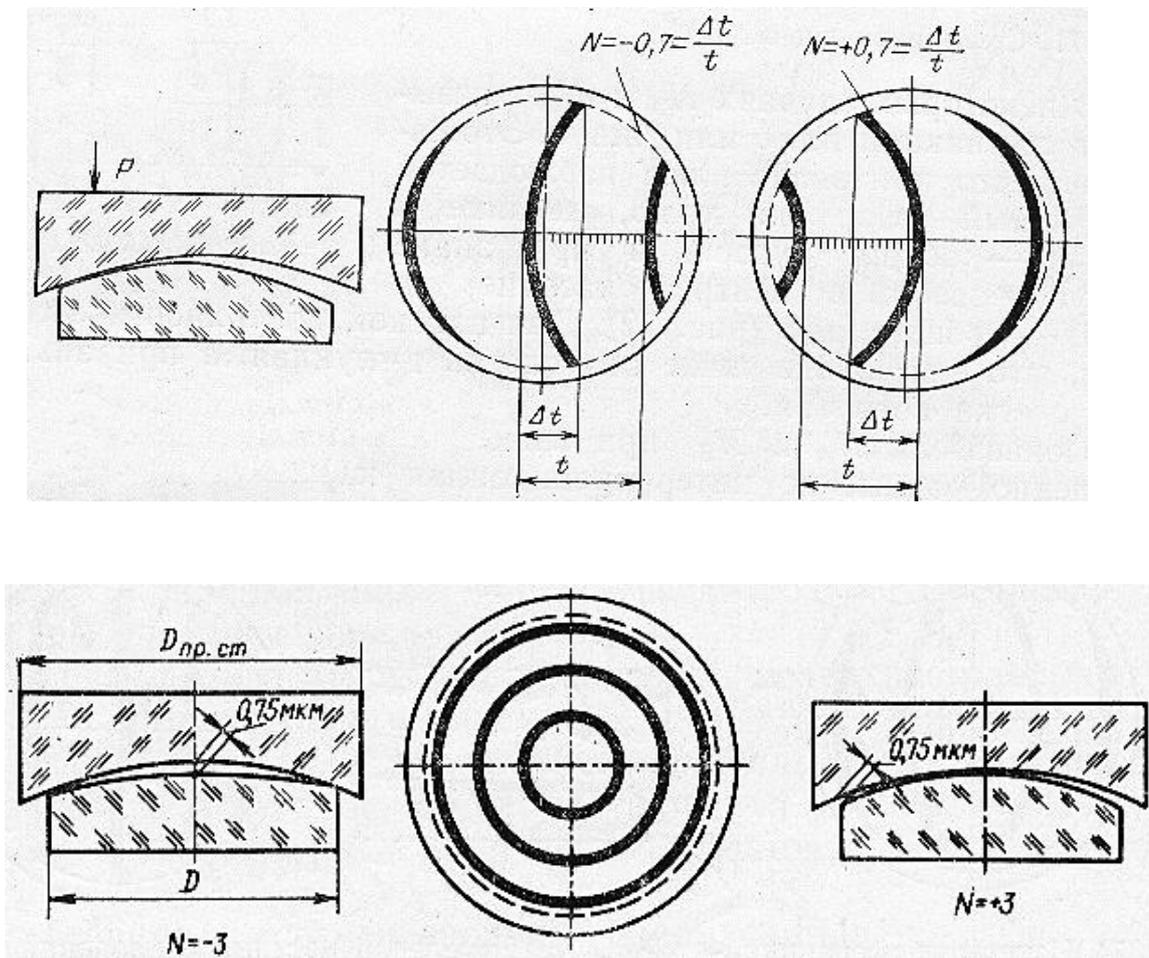


Рисунок 1.3. Измерение пробным стеклом отклонений формы поверхности линзы от заданной.

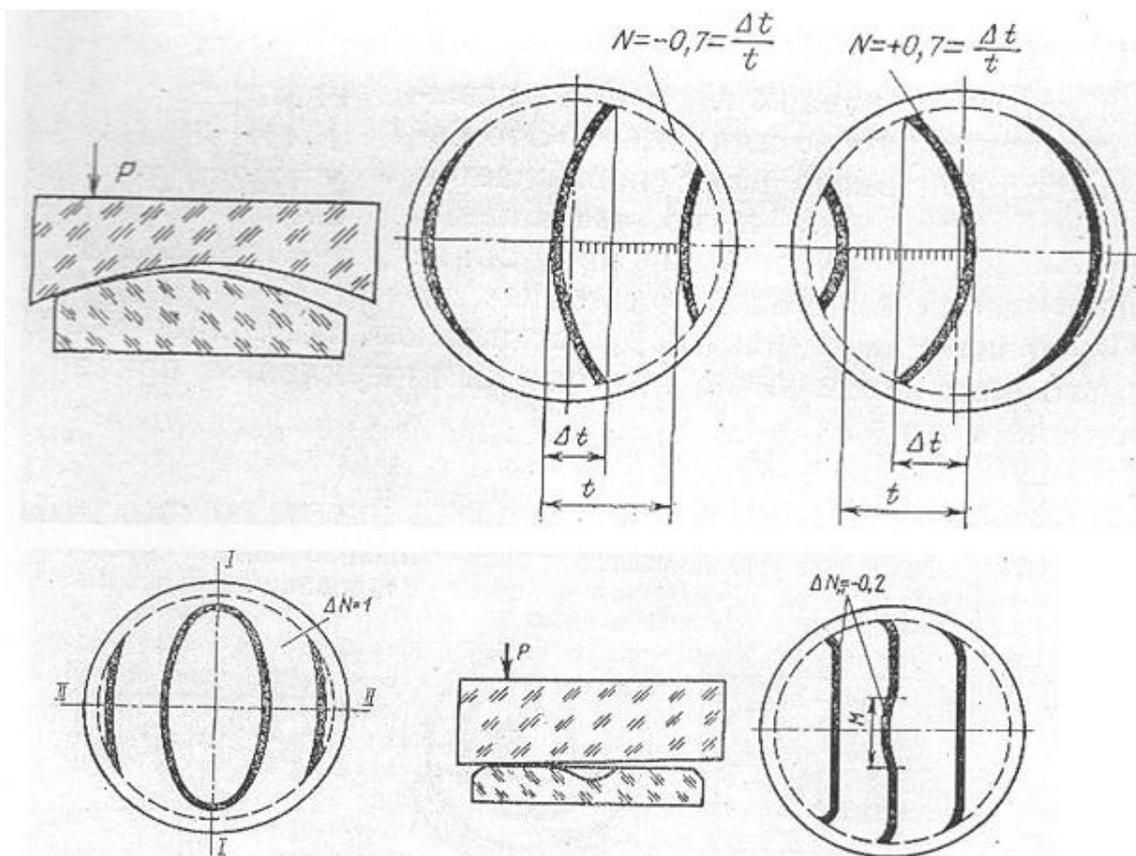


Рисунок 1.4. Измерение отклонений кривизны по полосам.
Определение вида погрешности

Допуск на стрелку кривизны оптических поверхностей измеряют числом интерференционных колец N . Одно кольцо соответствует половине длины волны, при которой производят оценку точности поверхности. В производственном обиходе интерференционную картину обычно называют «цветом», так как при освещении белым светом линии имеют радужную окраску. Величину N называют общей ошибкой поверхности, она прямо пропорциональна отклонению заданной поверхности от теоретической. В некоторых случаях общую ошибку N указывают со знаками плюс или минус. Это означает, что при знаке плюс наблюдается воздушный зазор на краю, касание в центре – «общий бугор», а при знаке минус – зазор в центре, касание на краю – «общая яма» (смотри рисунок 1.3.). Для плоской поверхности это означает, что при знаке плюс она слегка выпуклая, а при знаке минус - вогнутая.

Величина N при знаке плюс или минус может иметь численно равные значения, но интерференционная картина будет различной. При знаке плюс линии расходятся от точки приложения усилия P , сохраняя изогнутость внутрь; а при знаке минус линии сходятся к точке приложения усилия P , сохраняя изогнутость (смотри рисунок 1.4).

Измерение значения величины N не зависит от того замыкаются ли интерференционные кольца или нет. Общую ошибку определяют либо по количеству колец, видимых под пробным стеклом (рис.1.3), либо по отношению $\Delta t/t$, определяющему изогнутость линий (рис.1.4).

Если на интерференционной картине кольца вытянуты в одном направлении и сжаты в другом или изогнутые полосы не составляют часть окружности, то имеется общее отклонение формы поверхности от сферической. Такое отклонение называется астигматизмом поверхности. Геометрически это означает, что поверхность стала сфероцилиндрической (рис 1.5). Значение астигматизма определяется как разность числа колец по осям I-I и II-II.

Местные ошибки формы ΔN бывают симметричные относительно вершины сферического сегмента и несимметричные в разных местах поверхности (рис 1.6).

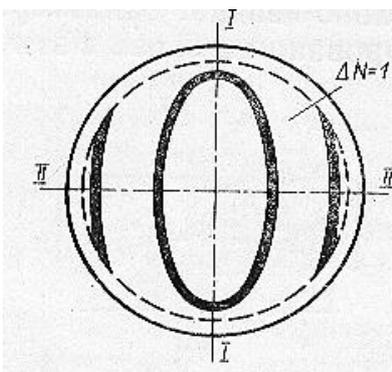


Рис 1.5. Измерение астигматизма

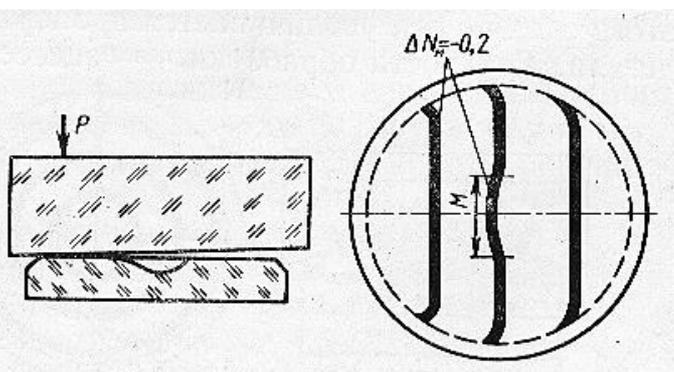


Рис 1.6. Измерение местных отклонений плоской поверхности.

При определении знака и величины местной ошибки (местный бугор, местная яма, приподнятый край, сорванный край) следует руководствоваться теми же правилами, что и при определении общей ошибки N .

Недостатком применения пробных стекол является то, что этот метод – контактный, то есть существует непосредственное механическое взаимодействие между пробным стеклом и контролируемой деталью.

От этого недостатка можно избавиться, если применять интерферометры. В них тоже существуют элементы, выполняющие роль пробных стекол, называемые эталоном. Методы интерферометрии позволяют избавиться от механического взаимодействия эталона и измеряемой детали, но и они имеют недостатки. Современные интерферометры имеют программное обеспечение, позволяющее определять отклонение формы поверхности от заданной с высокой точностью, составляющие десятые доли длины волны, на которой производится измерение.

Точность формы поверхности на чертежах указывается символами N_A и N_B – величина общей ошибки для каждой поверхности, соответственно, и ΔN_A и ΔN_B – величина местной ошибки, согласно ГОСТ 2.412-91.

Чистота поверхности. Класс чистоты (P) определяет ограничения на допустимые дефекты на поверхности оптического элемента. К таким дефектам относятся царапины, точки и выколки. Количество их должно соответствовать указанному на чертеже классу чистоты.

Отечественный стандарт предусматривает две группы классов дефектов: для деталей, расположенных в плоскости предмета или плоскости изображения оптического прибора (смотри таблицу 1.1.) и деталей, расположенных вне этих зон, а также для волоконно-оптических деталей (смотри таблицу 1.2). Для классов чистоты деталей, работающих в плоскости предмета или плоскости изображения оптического прибора, существуют 3 зоны: центральная, средняя и краевая. Их границы расположены на окружностях $1/3$ и $2/3$ от светового диаметра.

Для оценки чистоты деталей с интерференционным покрытием отечественные стандарты предусматривают, что из-за процесса формирования покрытия скрытые трещины поверхности становятся более четко выраженными, вследствие чего покрытие в местах трещин может отслаиваться и, как следствие, нарушится чистота поверхности. Поэтому деталь до покрытия должна быть выполнена с чистотой на 1-2 класса выше

Таблица 1.1.

Параметры классов чистоты оптических элементов, расположенных в плоскости предмета или плоскости изображения оптического прибора

Класс Чистоты	Зона	Царапины, мм		Точки, мм			
		Ширина, Не более	Σ длина, не более	\varnothing , не более	Число, не более, При $\varnothing_{\text{св}}$.		
					5-20	20-60	>60
						0	
0-10	Средняя	0,002	$0,2 \times \varnothing_{\text{св}}$	0,004	1	3	5
	Краевая	0,004	$0,3 \times \varnothing_{\text{св}}$	0,006	3	6	10
0-20	Средняя	0,004	$0,2 \times \varnothing_{\text{св}}$	0,010	1	3	5
	краевая	0,006	$0,3 \times \varnothing_{\text{св}}$	0,015	3	6	10
0-40	Средняя	0,006	$0,2 \times \varnothing_{\text{св}}$	0,015	1	3	5
	краевая	0,008	$0,3 \times \varnothing_{\text{св}}$	0,025	3	6	10

требований, предъявляемых к готовой детали. В результате готовая деталь с покрытием будет удовлетворять заданным требованиям по чистоте поверхности. Допустимые отклонения от взаимного расположения преломляющих и отражающих поверхностей указываются в таблице (рис.1.1), расположенной в поле чертежа для каждого вида оптической детали, они обозначаются различными символами. Это c - децентрировка для линз, θ - допустимое отклонение от параллельности для плоскопараллельных пластин, $\Delta\alpha$ - отклонение углов у призм, π - пирамидальность некоторых видов призм, соответствующая непараллельности граней призмы.

Таблица 1.2.

Параметры классов чистоты оптических элементов, расположенных вне плоскости предмета или вне плоскости изображения оптического прибора.

Классы чистоты	Царапины		Точки		Скопление Дефектов	
	Ширина, мм Не более	Σ длина, не более	\varnothing , мм не более	Число, Не более	\varnothing ограничивающий участок мм	Σ площадей мм ² не более
I	0,004	0,2× \varnothing св.	0,020	0,5× \varnothing св	1,0	0,004
II	0,006	0,2× \varnothing св.	0,050	0,5× \varnothing св	1,2	0,006
III	0,010	0,2× \varnothing св.	0,100	0,5× \varnothing св	2,0	0,020
IV	0,02	2,0× \varnothing св.	0,30	0,5× \varnothing св	5,0	0,10
V	0,04	2,0× \varnothing св.	0,50	0,5× \varnothing св	10,0	0,40
VI	0,06	2,0× \varnothing св.	0,70	0,5× \varnothing св	25,0	3,00
Классы чистоты	Царапины		точки		Скопление дефектов	
	Ширина, мм не более	Σ длина, не более	\varnothing , мм не более	Число, Не более	\varnothing ограничивающий участок мм	Σ площадь мм ² не более
VII	0,1	2,0× \varnothing св.	1,0	0,5× \varnothing св.	50,0	10,0
VIII	0,2	2,0× \varnothing св.	2,0	0,4× \varnothing св.	---	---
VIIIa	0,3	1,5× \varnothing св.	2,0	0,4× \varnothing св.	---	---
IX	0,3	2,0× \varnothing св.	3,0	0,3× \varnothing св.	---	---
IXa	0,4	1,5× \varnothing св.	3,0	0,3× \varnothing св.	---	---

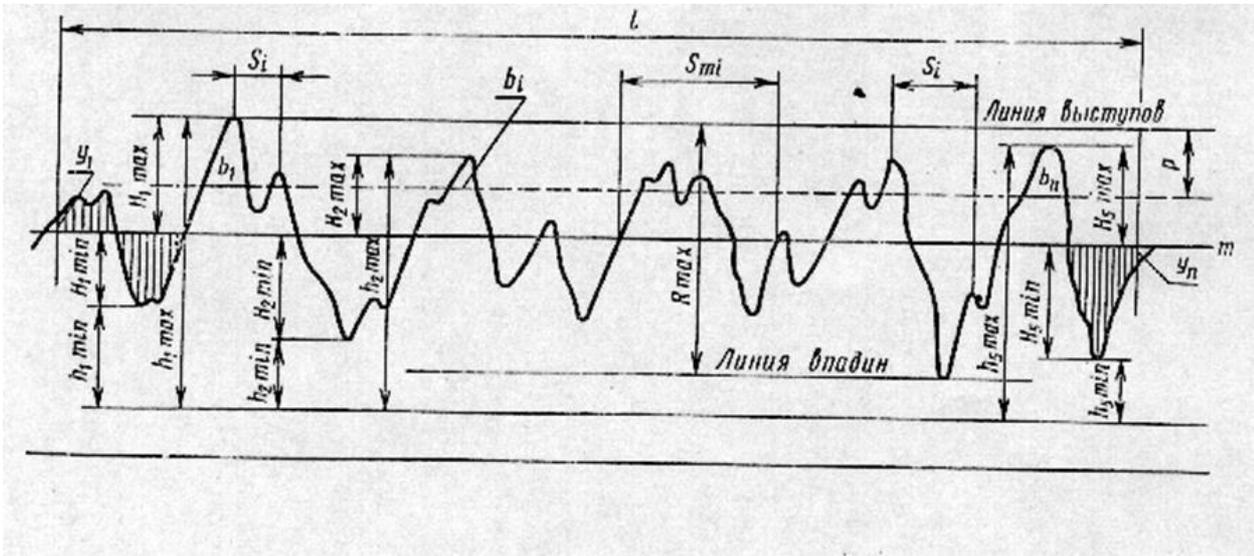


Рис 1.7. Основные параметры, характеризующие шероховатость поверхности

Световой диаметр, определяющий зону оптического элемента, через которую может пройти световой поток, должен быть указан для каждой поверхности ($\varnothing_{\text{Асв}}$, $\varnothing_{\text{Бсв}}$)

На чертежах, оформленных в соответствии с ГОСТ 2.412-91, над таблицей размещены требования к шероховатости поверхностей оптического элемента. Здесь указана величина среднего выступа на рассматриваемой поверхности на заданном отрезке (рис.1.7), которая может быть определена из представленных соотношений:

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx, \quad \text{или} \quad Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n |y|$$

$$Rz = \frac{\sum_{i=1}^5 |y_{pmi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{vmi}|}{5}$$

Требования к параметрам оптических материалов

На чертежах, оформленных в соответствии с ISO (рис.1.2), все требования к материалу, из которого изготовлен оптический элемент, и качеству его поверхностей представлены в таблице, расположенной под чертежом. В центральной части этой таблицы указываются требования к материалу, в левой и правой – к соответствующим поверхностям, требования

к шероховатости поверхности указано в поле чертежа для каждой поверхности.

В центральной части таблицы указана марка стекла, показатель преломления этого стекла для некоторой длины волны с допустимым отклонением, величина средней дисперсии. Ниже располагаются требования к двулучепреломлению, дефектам материала в виде пузырей и других включений, неоднородностью и свилями;

Характеристика допуска на двулучепреломление, вызываемое напряжением в стекле, определяется кодовым номером и величиной максимально допустимой разностью оптических путей на единицу длины пути Δs между ортогональными поляризациями света, проходящего через толщу образца (OPD). Эта характеристика является мерой двулучепреломления. Она определяется в нанометрах по формуле $\Delta s = a \cdot \sigma \cdot K$ где a - длина пути в образце, в сантиметрах; σ – остаточное напряжение, в ньютонах на квадратный миллиметр; K - разность между фотоупругими постоянными, в единицах 10^{-7} квадратных миллиметров на ньютон ($10^{-7} \text{ мм}^2 \cdot \text{Н}^{-1}$). OPD вызывается остаточным напряжением, двулучепреломление характеризуется в терминах разности оптических путей на единицу длины пути, в нанометрах на сантиметр. Запаздывание более чем на 20 нм/см на эталонной толщине, в общем, соответствует “сырому” отожженному стеклу, в то время как запаздывание меньше чем на 10 нм/см на эталонной толщине относится к “тонкому” отжигу и обычно характерно для точных оптических элементов.

Кодовым номером двулучепреломления, вызываемого напряжением, является число 0 (нуль). Обозначение указывается в виде: 0/A. Величина A соответствует максимально допустимому двулучепреломлению, вызываемому напряжением, в нанометрах на сантиметр оптической длины пути. Обозначение должно быть записано вблизи оптического элемента, к которому оно относится. Если необходимо, то обозначение может быть соединено с элементом с помощью линии - выноски. Предпочтительно его объединять с другими обозначениями дефектов материала (пузырностью, неоднородностью и свилями; см. ISO 10110-3 и ISO 10110-4).

Характеристика допуска на дефекты материала – пузыри и включения.
Пузыри: газовые пустоты в объеме материала, обычно круглого

поперечного сечения, которые иногда появляются в стекле как результат процесса изготовления. Другие включения: все локализованные в объеме материала дефекты в основном круглого поперечного сечения, включая узловы свили, небольшие камни, песчинки и кристаллы. В результате процесса плавки стекла, и его термообработки в стекле обнаруживаются пузыри и другие включения, распределенные примерно в постоянном количестве на единицу объема стекла. Их число зависит от марки стекла и метода изготовления.

Вредное воздействие пузырей и включений на качество оптического изображения приблизительно пропорционально их площади проекции поперечного сечения; вблизи плоскости изображения пузыри и другие включения нежелательны из-за их видимости. По этим причинам стекло традиционно классифицируется по классу пузырьности в терминах видимой площади поперечного сечения пузырей и других включений на единицу объема стекла; тем не менее, эта часть ISO 10110 применяется к отдельным оптическим элементам. Характеристика пузырей и других включений, которые допустимы в элементе, указывается в виде $N \times A$: N – число пузырей и включений максимально допустимого размера, принимаемых в расчет; градационное число A представляет меру их размера. Оно равно квадратному корню из спроектированной площади самого большого допустимого пузыря и/или включения, выраженного в миллиметрах.

Обозначение пузырей и других включений, которые допустимы в элементе, определяется кодовым номером и числовым выражением. Кодовым номером пузырей и других включений является число 1. Запись производится в виде: $1/N \times A$. Обозначение не должно быть записано вблизи оптического элемента, к которому оно относится. Если необходимо, то обозначение может быть соединено с элементом с помощью линии-выноски. Предпочтительно его объединять с другими обозначениями дефектов материала (двулучепреломлением, неоднородностями и свиллями). Альтернативно, для линзовых элементов, обозначение может приводиться в таблице в соответствии с ISO 10110-10.

Характеристика допуска на неоднородность и свиль

Под неоднородностью понимают постепенное изменение показателя преломления внутри оптического элемента, определяемое в виде разности между максимальной и минимальной величиной показателя преломления внутри элемента. Неоднородность вызывается изменением химического состава и другими эффектами внутри массы материала. Свиль - это неоднородности, имеющие небольшие пространственные размеры. Свиль может быть представлена в форме резко ограниченных нитеобразных областей, наиболее часто этот дефект наблюдается, когда стекло изготавливается методом плавки в глиняном горшке. Метод плавления в ванне, который может вызывать лентообразную структуру свилей, в настоящее время является более обычным при производстве оптического стекла. Бесконтактное измерение неоднородности внутри оптического элемента, как правило, является очень трудной задачей. Поэтому характеристика класса однородности оптического элемента очень полезна при выборе сырьевого материала. Для характеристики неоднородности устанавливается шесть классов (ISO 10110-4:1997(E)).

В противоположность неоднородности, свиль внутри готовой детали может быть легко обнаружена. Поэтому характеристика класса свили для оптического элемента служит не только отбору сырьевого материала, но и позволяет также проконтролировать, насколько соответствует готовая деталь техническим требованиям. Для этой цели свили согласно ISO 10110 подразделяются на пять характерных классов. Для классов 1...4 свили учитываются только, если они вызывают разность оптических путей Δs не менее 30 нм. При этом условии свили могут контролироваться и классифицироваться по их площади, спроектированной перпендикулярно оптическому пути, проходящему через элемент. Класс 5 допускает так же характеристику допусков на свили, вызывающих разность оптических путей, меньшую, чем 30 нм. Классы 1...4 касаются плотности свилей, которая определяется в виде отношения эффективной спроектированной площади свилей к площади контролируемой области. Класс 5 применяется к оптическим элементам с достаточно высокими требованиями по качеству. Ограничение свиллями, превышающими 30 нм разность оптических путей, в этом случае неприменимо. Следует отметить, что для очень слабых свилей

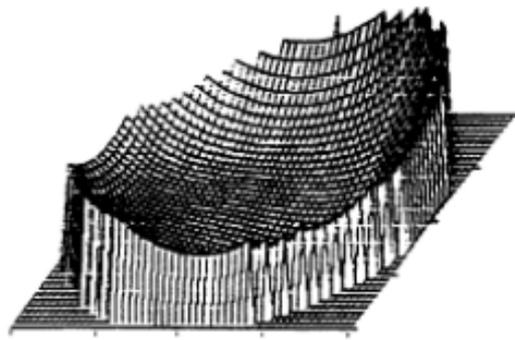
характеристика максимальной плотности не годится. Свилы, вызывающие разность оптических путей $\Delta s > 150$ нм, в оптических стеклах и стеклянных фильтрах обычно не встречается.

Эти дефекты материала обозначаются на чертежах кодовым номером, следующим за ним косым штрихом, и номерами классов неоднородности и свилей. Кодовым номером неоднородностей и свилей является число 2. Обозначение записывается следующим образом: 2/A; B, где A представляет номер класса неоднородности, а B представляет номер класса свили. Если характеристика однородности не нужна, то вместо A применяется черточка. Если характеристика свилей не нужна, то вместо B применяется черточка. Обозначение должно записываться вблизи оптического элемента, к которому оно относится. Если необходимо, то обозначение может соединяться с элементом с помощью линии-выноски. Предпочтительно объединять его с другими обозначениями дефектов материала (двулучепреломление и пузыри, см. ISO 10110-2 и ISO 10110-3).

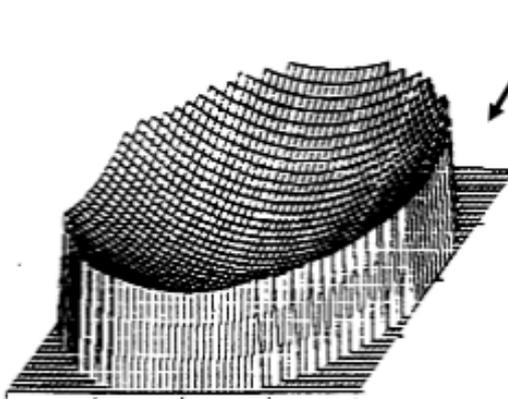
Допуски на форму поверхности

ISO 10110 оговаривает правила представления конструктивных и функциональных требований к оптическим элементам и системам на технических чертежах, используемых при производстве и контроле.

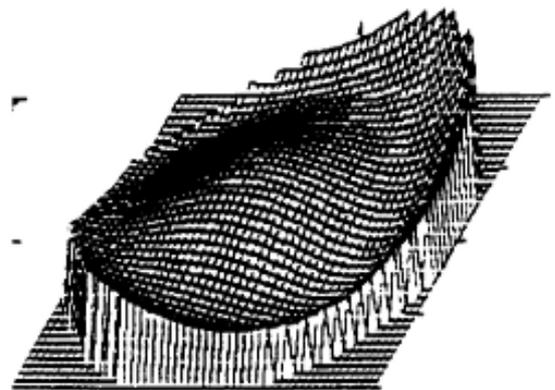
Отклонение формы поверхности: расстояние между контролируемой оптической поверхностью и номинальной теоретической поверхностью, измеряемое перпендикулярно теоретической поверхности, которая обычно параллельна контролируемой поверхности. Для целей контроля требуемая теоретическая поверхность может быть представлена с помощью контрольного стекла, интерферометрической эталонной поверхности или другого способа, измеряющего отклонение с достаточной точностью. Размах (PV) разности [peak-to-valley (PV) difference] (между двумя поверхностями): максимальное расстояние минус минимальное расстояние между поверхностями. Если одна из поверхностей является теоретической поверхностью, то возможно, что поверхности пересекаются; в этом случае минимальное расстояние между поверхностями является отрицательным числом. Знак должен быть учтён при подсчёте PV разности.



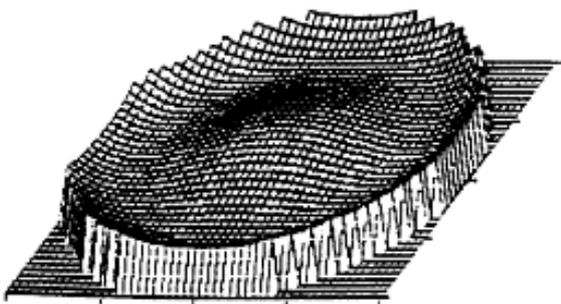
а) Отклонение измеренной поверхности



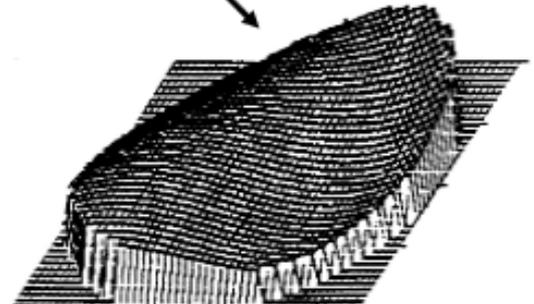
б) Ближайшая сферическая поверхность, которая определяет нерегулярность



с) Функция нерегулярности, которая определяет нерегулярность



д) Ближайшая (обладающая симметрией вращения) асферическая поверхность, которая определяет нерегулярность, обладающую симметрией вращения



е) Поверхность, оставшаяся после удаления в) и д), которая определяет среднеквадратическую (rms) асимметрию

Рис.1.8. Пример измерений поверхности и её разложений по типам ошибок поверхности.

Единица интервала интерференционной полосы: отклонение формы поверхности, равное половине длины волны света. Когда поверхность контролируется интерферометрическим методом, отклонение формы поверхности в половину длины волны света вызывает интерференционную картину, в которой интенсивность изменяется от одной яркой интерференционной полосы до следующей, или от одной темной интерференционной полосы до следующей - т.е. наблюдается один “интервал интерференционной полосы”. Для этой цели часть ISO 10110 слова “интервалы интерференционной полос” относятся не к поперечному расстоянию между интерференционными полосами, а к факту, что число интервалов интерференционных полос, наблюдаемых на интерференционной картине, соответствует числу полуволн отклонения формы поверхности. Функция суммарного отклонения поверхности – это теоретическая поверхность, определяемая по разности между реальной поверхностью и желаемой теоретической поверхностью (рис.1.8а). Ближайшей сферической поверхностью является сферическая поверхность, для которой среднеквадратичная (rms) разность для функции суммарного отклонения поверхности является минимальной (рис.1.8в). Ошибка стрелки (sagitta error): размах разности между ближайшей сферической поверхностью и плоскостью. Ошибка стрелки происходит из контролируемой поверхности, имеющей радиус кривизны, отличающийся от номинального радиуса.

Теоретическая поверхность, определяемая по разности между функцией суммарного отклонения поверхности и ближайшей сферической поверхностью (рис. 1.8с).

Размах (PV) разности между функцией нерегулярности и плоскостью, которая лучше всего приближается к ней. Для номинальных сферических поверхностей нерегулярность представляет отклонение поверхности от сферичности. Для асферических поверхностей регулярность представляет сферическую часть функции суммарного отклонения поверхности. Ближайшая асферическая поверхность: поверхность, обладающая симметрией вращения, для которой среднеквадратичная (rms) разность функции нерегулярности минимальна (рис.1.8d), Среднеквадратичная

величина разности между функцией нерегулярности и ближайшей асферической поверхностью (рис. 1.8e).

Допуски на отклонение формы поверхности указываются посредством подробного обозначения максимально допустимых величин ошибки стрелки, нерегулярности и/или нерегулярности, обладающей симметрией вращения. Кроме того, могут быть указаны допуски для трех среднеквадратических (rms) критериев отклонения формы поверхности. Эти среднеквадратические (rms) критерии отклонения представляют среднеквадратическую (rms) величину функции, остающейся после вычитания различных типов отклонений поверхности.

Допуск на форму поверхности обозначается кодовым номером и обозначениями допусков для ошибки стрелки, нерегулярности; нерегулярности, обладающей симметрией вращения, и типов среднеквадратического (rms) отклонения, соответственно. Кодовым номером допуска на форму поверхности является число 3. Обозначение должно иметь одну из трех форм: $3/A(B/C)$, или $3/A(B/C) \text{ RMS } x < D$ (где x является одной из букв t , i или a), или $3/- \text{ RMS } x < D$ (где x является одной из букв t , i или a).

Величина A является либо максимально допустимой ошибкой стрелки, выраженной в интервалах интерференционных полос; или черточкой ($-$), обозначающей, что суммарный допуск на радиус кривизны приведен на размере радиуса кривизны (для плоских поверхностей не применяется). Величина B является или максимально допустимой величиной нерегулярности, выражаемой в интервалах интерференционных полос; или черточкой ($-$), обозначающей, что точный допуск на нерегулярность не приводится. Величина C является допустимой нерегулярностью, обладающей симметрией вращения, выражаемой в интервалах интерференционных полос. Если допуск не приводится, то косая черточка ($/$) заменяется конечной круглой скобкой, т.е. $3/A(B)$. Если допуск не приводится для всех трех типов отклонения, то тогда A , B , C , косая черточка ($/$) и круглые скобки заменяются единственной черточкой ($-$), т.е. $3/-$. Величина D является максимально допустимой величиной среднеквадратической (rms) величины типа, характеризуемого знаком x , где знак x является одной из букв t , i или a . Характеристика более чем одного

типа среднеквадратического (rms) отклонения является допустимой. Эти характеристики должны разделяться точкой с запятой. Указанные допуски на форму поверхности применяются к оптически эффективной области, за исключением случая, когда обозначение применяется к небольшому контролируемому полю при всех допустимых положениях внутри оптически эффективной области. В этом случае должен добавляться к обозначению допуска диаметр контроливаемого поля следующим образом: $3/A (B/C) \text{ RMS } x < D$ (весь). Нет положения, позволяющего давать характеристику допуска на PV для суммарного отклонения поверхности (т.е. включая как ошибку стрелки, так и нерегулярность). Если такая характеристика необходима, то эта информация должна приводиться в примечании к рисунку. Обозначение должно быть показано в связи с выносной линией к поверхности, к которой она относится, и должно объединяться с ошибками центрировки и дефектами поверхности. Альтернативно, для линзовых элементов обозначение может приводиться в таблице. Если два или более оптических элемента склеиваются (или ставятся на оптический контакт), допуски на форму поверхности, приводимые для отдельных элементов, применяются так же к поверхностям оптических сборочных узлов, т.е. после склеивания (или постановки на оптический контакт), если не указывается другое.

Допуски на центрировку. Для определения этого параметра оптического элемента или системы применяются следующие определения: оптическая ось (оптической системы): теоретическая ось, вокруг которой оптическая система обладает номинально симметрией вращения. Исключением являются отклоняющие элементы и системы, такие как плоские зеркала, призмы и прочие. Базовая ось: ось, выбираемая с учетом специфических особенностей оптической системы. Она служит в качестве эталона для размещения поверхностей, элементов и сборок. В этой части ISO 10110 определения базовых осей делаются в соответствии с общими принципами, приводимыми в ISO 5459.

Базовая точка: характерная точка на базовой оси. Она служит в качестве дополнительного эталона к размещению оптической системы. Угол наклона сферической поверхности – угол между базовой осью и нормалью к поверхности в точке пересечения ее с базовой осью (рис.1.19).



Рис.1.19 Угол наклона отдельной сферической поверхности

ISO 10110 оговаривает правила обозначения допустимого уровня дефектов поверхности (царапины, проколы, следы зажима, внешние дефекты обработки и др.) внутри светового диаметра, присутствующие на оптических поверхностях отдельных оптических элементов. Указывается также и метод определения размера допустимых выколов. Следует отметить, что указанный уровень дефектов поверхности учитывает как функциональные результаты (касающиеся формирования изображения или срока службы оптического элемента), так и косметические (эстетические) впечатления. Требования, предъявляемые к уровню дефектов, применяются одновременно к преломляющим и отражающим поверхностям. Они применяются к готовым оптическим элементам (включая обработку) и не применяется к сборкам. Эти требования признают, что допустимые дефекты поверхности могут быть уточнены соответственно одним из двух методов, либо методом I (зона поверхности, затемняемая или производящая впечатление затемняемой дефектами), либо методом II (видимость дефектов). Правила указания допустимых дефектов поверхности приведены для обоих случаев.

Дефекты поверхности – это дефекты, локализованные внутри оптически действующего отверстия поверхности, полученные в результате некорректной обработки во время или после процесса изготовления. Примерами дефектов поверхности являются: царапины, проколы,

прополированные пузыри, прожилки, царапины и следы зажима. Сюда также включены и имеющиеся внешние дефекты обработки, такие как серые пятна, закрашивания, которые поглощают или отражают свет иначе, чем остальное покрытие. Длинные царапины: тонкие дефекты поверхности с наибольшей длиной 2 мм. Они больше бросаются в глаза, чем более короткие дефекты той же ширины, из-за своей длины. Длинные царапины и внешние дефекты обработки не указываются по отдельности, кроме случая, когда используется метод I. Выколки – это дефекты, сосредоточенные по периметру элемента. Даже если выколки находятся вне рабочей оптической зоны, они могут навредить испытанию оптических систем, затрудняя крепление элементов, фактически они представляют источник дифракции света или источники возникновения трещин.

Обозначение допустимых дефектов поверхности определяется кодовым номером и числовым значением. Кодовым номером дефектов поверхности является цифра 5. Числовые значения зависят от используемого метода (метода I или метода II).

На чертежах, оформленных в соответствии с ГОСТ, над таблицей размещены требования к шероховатости поверхностей оптического элемента. Здесь указана величина среднего выступа на рассматриваемой поверхности.

На чертежах, оформленных в соответствии с ISO, требования к шероховатости указаны непосредственно на изображении оптического элемента. Здесь указываются полированные и шлифованные поверхности. При этом следует помнить, что полированными поверхностями для рассматриваемого диапазона излучения являются поверхности, неровности которых меньше длины волны рабочего излучения спектра.

Увеличение размера неровностей поверхности приводит к рассеянию падающего излучения, что снижает качество передаваемой информации, Ухудшение качества передаваемого изображения связано с уменьшением пропускания оптических элементов, входящих в передающий тракт, и контрастности передаваемого изображения.

2. МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИ ПОВЕРХНОСТИ, ЯВЛЯЮЩЕЙСЯ ГРАНИЦЕЙ РАЗДЕЛА ДВУХ СРЕД С РАЗНЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Рассмотрим существующие в настоящее время наиболее часто используемые способы формообразования оптических поверхностей и определим причины возникновения на их поверхности «слоя», вызывающего рассеяние излучения.

Всё применяемые в настоящее время способы формообразования условно можно разделить на две группы: классический (механический) метод и методы, предназначенные для получения сверхгладких поверхностей.

Классический метод формообразования оптических поверхностей основан на использовании микрочастиц твёрдого материала (абразивов), способных разрушать оптический материал (стекло, кристалл). Материалом, из которого изготавливается абразив, обычно является алмаз, электрокорунд, карбид кремния, используемый на первой стадии обработки поверхности. Далее детали обрабатываются микроэлементами, в состав которых входят окислы металлов, которые находятся в свободном или связанном состоянии.

Процесс получения полированной поверхности осуществляется в несколько этапов. На первом этапе поверхность обрабатывают абразивом, который находится в связанном состоянии. Обычно для этого используются частицы алмаза, электрокорунда, карбида кремния, которые закреплены в металле. Эта операция представляет собой процесс хрупкого разрушения стекла, которое происходит в результате царапающего воздействия закрепленных алмазных зерен (рис.2.1).

Когда режущая кромка зерна вступает в контакт со стеклом, в его поверхностном слое под действием сил, совпадающих с направлением подачи и направлением движения инструмента, возникают напряжения. По мере нарастания силы резания напряжения увеличиваются, достигают предела прочности стекла и превышают его. При этом перед режущей кромкой зерна появляются трещины, направленные в сторону его движения.

Происходит хрупкое разрушение стекла - выкалывание частиц, отделяемых от основной массы.

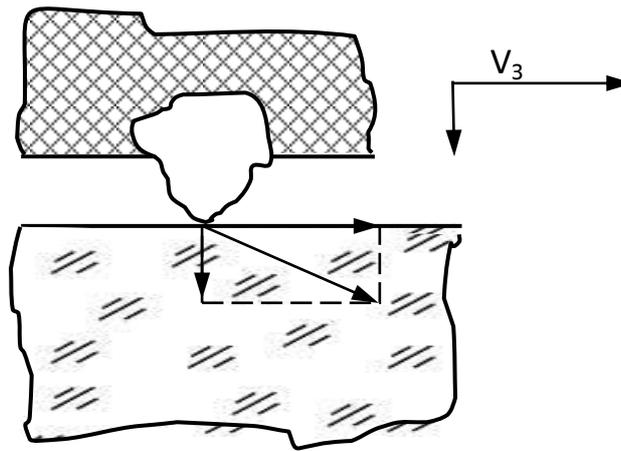


Рис.2.1. Разрушение стекла закрепленным алмазным зерном.

На работающее алмазное зерно действует сила P_p (рис.2.2), с которой стекло сопротивляется оказываемому на него разрушающему воздействию. Составляют ее P_y - осевая сила, направленная в сторону, противоположную усилию прижима зерна к стеклу; P_x - сила, действующая в плоскости движения зерна по стрелке V_3 и направленная в сторону противоположную этому движению; P_z - сила, действующая в плоскости движения зерна по стрелке V_3 и направленная в сторону противоположную этому движению. Силы P_y , P_x , и P_z возникают вследствие сопротивления стекла его разрушению, так и в результате трения зерен и связки о поверхность стекла и о продукты его износа. При этом сила P_y стремится переместить зерно в материал связки, но, встречая сопротивление последней, вдавливают его в стекло. Силы P_x и P_z стремятся вырвать зерно из связки, создавая опрокидывающие моменты на плече, равном высоте его выступающей части $h_{вч}$. Для зернистостей алмаза от 125/100 она пропорциональна максимальному размеру зерна основной фракции и составляет $0,3z_{ал}$. При большей крупности алмаза из-за возрастающих усилий P_x и P_z уровень погружения зерна в связку увеличивается. В отдельных случаях (при распиливании, сверлении и других операциях) одна из тангенциальных составляющих может отсутствовать.

В процессе работы инструмента режущая кромка зерен притупляется, а удерживающая их связка изнашивается. При этом под воздействием возрастающего сопротивления стекла прочность закрепления зерен достигает критического значения, и они могут быть вырваны из связки. Взамен их в работу вступают новые. Происходит самозатачивание инструмента. Условием самозатачивания является сбалансированный износ зерен с износом связки, Если этот баланс нарушен, то нарушается и режим самозатачивания. Режущая способность инструмента снижается.

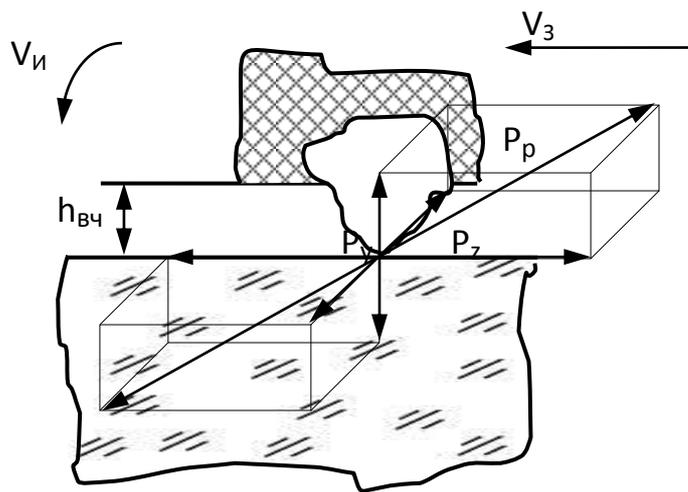


Рис. 2.2. Силы, действующие на закрепленное алмазное зерно.

При дальнейшем движении зерно вновь входит в контакт со стеклом, процесс нарастания усилий, напряжений и разрушения повторяются. Вдоль пути, пройденного единичным зерном, остается царапина. Взаимное пересечение большого числа царапин, нанесенных всеми одновременно работающими зернами, приводит к отделению множества частиц. Образуется шероховатая, шлифованная поверхность.

Величина микронеровностей на этом этапе соизмерима с величиной зёрен. Размер используемых зёрен не может быть минимизирован, поскольку они должны быть фиксированы в материале инструмента. В результате размер микронеровностей не может быть меньше 1.5 мкм, что не соответствует требованиям к полированным поверхностям. На этом этапе помимо шероховатого слоя образуется трещиноватый слой, поскольку

трещины, возникшие в стекле, могли проникнуть в стекло на большое расстояние.

На следующем этапе стекло обрабатывается свободным абразивом, размер зёрен которых намного меньше, чем у предыдущих.

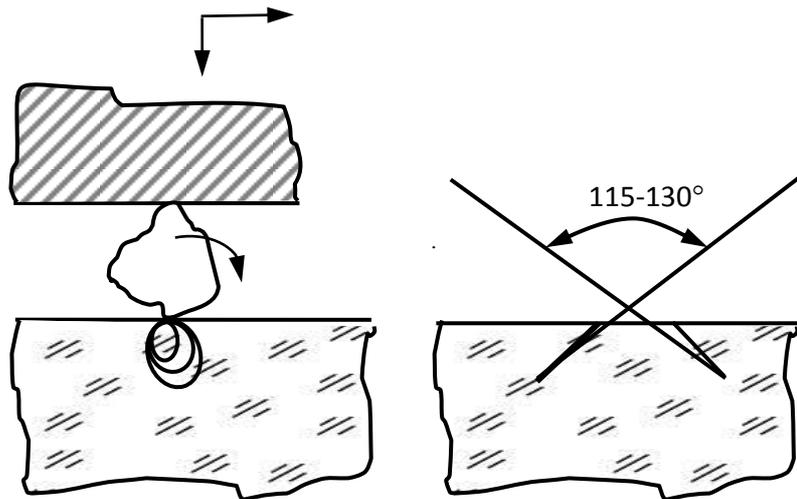


Рис. 2.3. Разрушение поверхности стекла зерном свободного абразива.

При данном способе обработки стекло разрушается под действием перекатывающихся зерен, которые находятся в зазоре между поверхностью изделия и инструмента (рис. 2.3.), последние прижаты с некоторым усилием друг к другу и совершают относительное перемещение. Размер зерен мал, поэтому перекатываются они с большими угловыми скоростями, и, вступая в контакт со стеклом, наносят удар. В точке контакта возникают напряжения сжатия, направленные в основном в сторону приложенного усилия. По мере возрастания усилий пространство, занимаемое напряжениями, увеличивается. У поверхности они действуют как растягивающие и, превысив предел прочности стекла на разрыв, отрывают наружные слои стекла от внутренних. Возникает трещина конической формы. При перекатывании зерен по тем же местам трещины пересекаются и отделяют частицы стекла от основной массы. Образуется рельеф в виде множества выступов и впадин, который представляет шероховатость, характерную для шлифованной поверхности. Статистический характер воздействия большого числа одновременно работающих зерен и малое рассеяние энергии элементарного разрушения определяет исключительную однородность рельефа шлифованной поверхности. В энергетическом отношении коэффициент полезного действия процесса шлифования свободным

абразивом очень мал. Энергия на диспергирование составляет сотые доли процента от всей затраченной механической работы. Остальная ее часть переходит в тепло.

Строение шлифованной поверхности.

Неровности шлифованной поверхности представляют рельефный слой, характеризуемый высотой h_p и показателем преломления n_p (рис. 2.4). При шлифовании алмазным инструментом с зернистостью алмаза от 250/200 до 80/63 или свободным абразивом зернистостей от №16 до №4 шероховатость характеризуют максимальной высотой неровностей R_z . При шлифовании алмазным инструментом зернистостью от М40 до М3 - средним арифметическим отклонением профиля - R_a . [4].

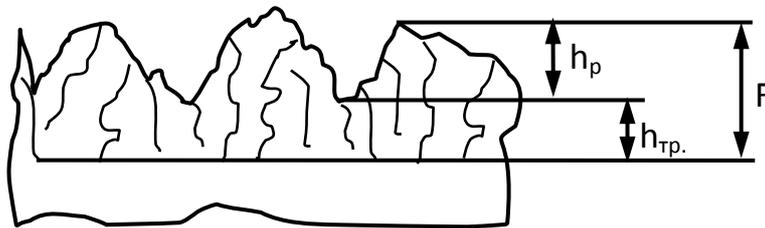


Рис. 2.4. Строение шлифованной поверхности.

Угол при вершине выступов и впадин неровностей шлифованной поверхности равен $115-130^\circ$ и не зависит от зернистости абразива. Хотя и некая, наблюдается недостаточно четкая зависимость его значения от химического состава стекла, определяющего механическую прочность последнего. С повышением прочности стекла угол возрастает.

При шлифовании хрупких материалов неровностям поверхности, представляющим рельефный слой, всегда сопутствует объемная сетка трещин, распространяющихся вглубь стекла от уровня впадин. Эта зона носит название трещиноватого слоя и характеризуется высотой $h_{тр.}$ и показателем преломления $n_{тр.}$ Общая глубина разрушения представляет собой нарушенный слой - F . Отношение толщины F нарушенного слоя к высоте h_p рельефного слоя не зависит от марки стекла, зернистости абразива и для данного способа механической обработки является величиной

Таблица 2.1.

Связь параметров шероховатости со способами ее механической обработки.

Параметры шероховатости		Способ обработки поверхности
R_a	R_z	
	80	Распиливание, сверление, шлифование алмазным инструментом зернистостей 400/3I5-250/200 или свободным абразивом №25 - №16.
	40	Те же операции выполняемые алмазным инструментом зернистостей 200/I60 - I60/I25 или свободным абразивом №16 - №10.
20	20	Те же операции, а также круглое шлифование пластин, центрирование линз, шлифование алмазным инструментом зернистостей 125/I00 - 80/63 или свободным абразивом №8 - №4.
1,6		Круглое шлифование пластин, центрирование линз, шлифование алмазным инструментом зернистостей 63/50 - 50/40 или свободным абразивом №6 - №40.
0,8		Те же операции, выполняемые алмазным инструментом зернистостей 50/40 - 40/28, или свободным абразивом M28 - M20.
0,4		Центрирование линз, тонкое шлифование алмазным инструментом зернистостей 28/20 - 20/I4 или свободным абразивом MI4 - M10.
0,2		Тонкое шлифование алмазным инструментом зернистостей 14/I0 - 10/7 или свободным абразивом M7 - M5.
0,1 0,05 0,025		Та же операция, выполняемая алмазным инструментом зернистостей 7/5 - 5/3 или свободным абразивом M5 – M3.
	0,1	Полирование на инструменте из технических шерстяных тканей, синтетических материалов. Допускаются следы недополировки.
	0,05	Та же операция. Материал рабочей поверхности инструмента - смола, технические шерстяные ткани, синтетические вещества. Поверхности дополнительно характеризуют классом чистоты по ГОСТ 11141-84.

постоянной: 2,7 и 4,0 - при шлифовании алмазным инструментом и свободным абразивом, соответственно.

При шлифовании хрупких материалов неровностям поверхности, представляющим рельефный слой, всегда сопутствует объемная сетка трещин, распространяющихся вглубь стекла от уровня впадин. Эта зона носит название трещиноватого слоя и характеризуется высотой $h_{тр}$ и показателем преломления $n_{тр}$. Общая глубина разрушения представляет собой нарушенный слой - F . Отношение толщины F нарушенного слоя к высоте h_r рельефного слоя не зависит от марки стекла, зернистости абразива и для данного способа механической обработки является величиной постоянной: 2,7 и 4,0 - при шлифовании алмазным инструментом и свободным абразивом, соответственно.

При шлифовании свободным абразивом толщина нарушенного слоя пропорциональна зернистости абразива и коррелирует с относительной твердостью стекла по сошлифовыванию – K_T . Для стекла марки x толщину слоя, нарушенного абразивом зернистости M , находят умножением ее значения F_M^{K8} для стекла марки $K8$ на соответствующий стеклу марки x коэффициент K_T , т.е. $F_M^x = F_M^{K8} \cdot 1,25 / K_T$.

При шлифовании алмазным инструментом зависимость между F и зернистостью алмазного порошка носит квадратичный характер. Меньшая толщина нарушенного слоя является следствием меньшего угла, под которым разрушающие усилия направлены к обрабатываемой поверхности, и действием силы трения, которая смещает в этом направлении максимальные касательные напряжения

Связь параметров шероховатости со способами ее механической обработки представлена в таблице 2.1. Сведения о толщине нарушенного обработкой слоя в зависимости от зернистости абразива представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2.

Толщина нарушенного обработкой слоя в зависимости от зернистости абразива.

Зернистость абразива, мкм	Толщина нарушенного слоя F, мкм	
	Свободный абразив (эл. корунд белый).	Инструмент из синтетических алмазов на металл. связке
7-5	5	6
10-7	7	8
14-10	10	10
20-14	15	13
28-20	22	20
40-28	35	25
50-40	43	27
63-50	51	30
80-63	79	35
100-80	96	48
125-100	122	50
160-125	160	60

Рельефный слой h_p на механическую прочность стекла не влияет, но она возрастает с уменьшением трещиноватого. Необходимым условием повышения механической прочности является высокая однородность зернового состава шлифующего абразива, с которой связана глубина проникновения трещин. Исходя из условий эксплуатации оптических элементов, которые подвергаются в основном растяжению и изгибу, прочность стекла определяют методом симметричного изгиба.

В результате такой обработки на поверхности оптического материала образуются два слоя с различными показателями преломления. Эти показатели преломления отличаются от показателя преломления оптического материала. В дальнейшем рассмотрим, как это будет влиять на эксплуатационные характеристики оптического элемента. К этим характеристикам относятся: механическая прочность, лучевая стойкость и отражательная способность элемента.

При рассмотрении рельефного слоя следует учитывать, что он является рассеивающим и в его микровпадинах может происходить скопление влаги, загрязняющих микроэлементов. Последнее ухудшает адгезию слоёв, формируемых на оптических поверхностях, с целью изменения их физико-химических свойств.

Анализ трещиноватого слоя показывает, что в трещинах скапливаются влага и газы, содержащиеся в окружающей среде. Коэффициент термического расширения этих материалов отличается от коэффициента термического расширения оптического материала. Часто он превышает последний. При попадании на оптическую поверхность мощного излучения, например лазерного, разогрев поверхностного слоя, который не однороден по своему химическому составу, может привести к механическому разрушению последнего. Такое разрушение не только портит полированную поверхность, но и нарушает свойства этой поверхности. Минимизация размеров нарушенного слоя является актуальной задачей современного приборостроения.

В настоящее время более 80% оптических поверхностей имеют такую структуру, и поэтому при рассмотрении явлений, происходящих с излучением на такой границе, при анализе всех факторов, влияющих на прохождение излучения, следует рассматривать эту границы не в классическом варианте, а в реальном.

Напомню вам, что в классическом варианте при рассмотрении явлений с электромагнитной волной, падающей на такую границу, рассматривается две полубесконечные среды с разными показателями преломления (3) и чёткой границей между ними, в реальных условиях эта граница имеет вид, представленный на рис. 2.4.

Все явления, происходящие с электромагнитной волной на такой границе, будут рассмотрены ниже. Далее рассмотрим некоторые методы обработки оптических материалов, позволяющие минимизировать шероховатость поверхности.

Сверхгладкие поверхности. Расширение функциональных возможностей и точностных параметров современных оптико-механических приборов и оптико-электронных устройств требует создания изделий с минимально возможной шероховатостью поверхности. В свете современных

задач сверхгладкими считаются поверхности, для которых среднеквадратичное отклонение (RMS) микротопологии находится на уровне 1 \AA . Такие поверхности необходимы для устройств, работающих в УФ области спектра (вплоть до длины волны 13 нм), а также для элементов с предельно малым рассеянием, работающих в любой части спектра.

В настоящее время во всем мире ведутся интенсивные работы по созданию технологии получения таких поверхностей с использованием различных методов обработки оптических материалов. На рис.2.5 изображена диаграмма, иллюстрирующая возможности методов с точки зрения получения сверхгладких поверхностей, из которой видно, что наименьшую шероховатость дают методы, основанные на ионной обработке поверхности (сравниваются промышленные методы).

Степень влияния шероховатости поверхности на характеристики оптической системы зависит от рабочей области спектра. Поэтому «гладкость» оптической поверхности имеет смысл по отношению к той области спектра (рабочей длине волны), где предполагается использование этого оптического элемента. В связи с этим RMS (среднеквадратичное отклонение (RMS) микротопологии) как интегральный показатель шероховатости, не дает полного представления о влиянии структуры рельефного слоя на оптические свойства поверхности. Более информативным является распределение плотности мощности дефектов по спектру (так называемая функция ФСПМ или PSD) в интересующем нас диапазоне частот. В целом разделяют низкочастотные дефекты с периодом более 1 мкм и высокочастотные с периодом до 10 нм . К низкочастотным относятся, как правило, остаточные после абразивной обработки дефекты типа сетки царапин, к высокочастотным - рельефные микронеровности. Поскольку проблема сверхгладких поверхностей особо актуальна для элементов, работающих в УФ области спектра вплоть до длины волны 13 нм очевидно, что основное внимание исследователи уделяют динамике дефектов сравнимых с длиной волны, т.е. высокочастотных.



Рис. 2.5.

Диаграмма современных методов получения сверхгладких поверхностей.

CNC-полировка на станках с ЧПУ, FP- полировка флоат –процессом, EEM-эластичная эмиссионная обработка, SPDT-алмазное точение, EAFM-электролитическая абразивная доводка зеркал, DG-эластичный притир, IBF-ионное травление, RIBF-реактивное ионное травление, PACE-химическое травление в плазме, CVM-обработка химическими парами, MFAFF-тонкая доводка в магнитном поле, MRf-магнитореологическая финишная обработка, FAG-обработка связанным абразивом [6].

При рассмотрении поверхности среды, через которую проходит электромагнитное излучение, всегда следует помнить, что эта поверхность является границей между средами с различными показателями преломления. Эти показатели преломления могут быть как вещественными, в случае, когда среды являются не поглощающими, так и комплексными, если в них присутствует поглощение. С учётом ранее рассмотренной ситуации, когда на границы раздела стекла и воздуха присутствуют два слоя, можно сказать, что при прохождении излучения из воздуха в стекло или другой оптический материал оно преодолевает три границы: воздух - рельефный слой, рельефный слой – трещиноватый слой, трещиноватый слой – стекло.

3. ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ, ПРОИСХОДЯЩИЕ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ДВУХ СРЕД

Рассмотрим явления, происходящие на границе двух сред, имеющих различные показатели преломления. Простейшим примером такой ситуации является поверхность (идеализированная) оптического элемента. На начальном этапе для простоты анализа будем рассматривать только непоглощающие среды. На такой границе электромагнитное излучение будет частично отражаться и частично проходить сквозь эту границу [5].

Падающая электромагнитная волна является р - поляризованной, если вектор напряжённости электрического поля волны лежит в плоскости падения, и s поляризованной, если вектор напряжённости электрического поля волны лежит в плоскости перпендикулярной плоскости падения излучения. Коэффициенты отражения (r_p и r_s) и пропускания (t_p и t_s) для этих составляющих будут различны и определяться согласно зависимостям 3.1 и 3.2.

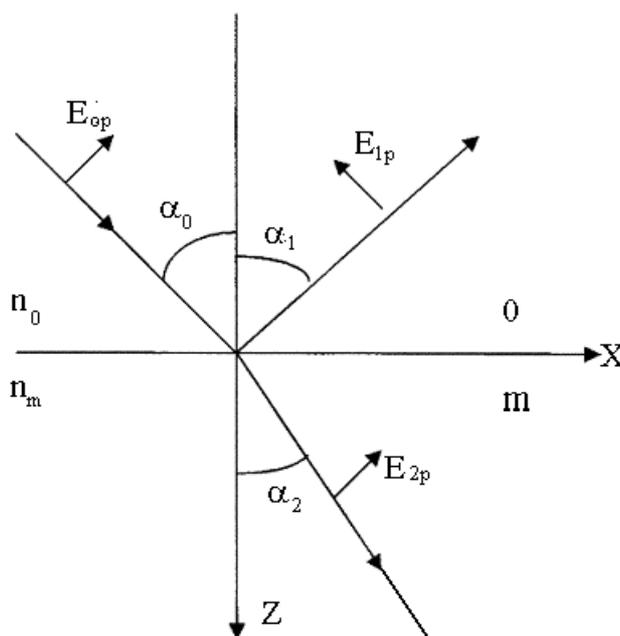


Рис.3.1. Схема направления распространения падающего, отражённого и прошедшего излучения.

$$\begin{cases} t_p = \frac{2n_0 \cos \alpha_0}{n_m \cos \alpha_0 + n_0 \cos \alpha_2} = \frac{2 \sin \alpha_2 \cos \alpha_0}{\sin(\alpha_0 + \alpha_2) \cos(\alpha_0 - \alpha_2)}, \\ t_s = \frac{2n_1 \cos \alpha_0}{n_0 \cos \alpha_0 + n_m \cos \alpha_2} = \frac{2 \sin \alpha_2 \cos \alpha_0}{\sin(\alpha_0 + \alpha_2)}; \end{cases} \quad (3.1)$$

$$\begin{cases} r_p = \frac{n_m \cos \alpha_0 - n_0 \cos \alpha_2}{n_m \cos \alpha_0 + n_0 \cos \alpha_2} = \frac{\operatorname{tg}(\alpha_0 - \alpha_2)}{\operatorname{tg}(\alpha_0 + \alpha_2)}, \\ r_s = \frac{n_0 \cos \alpha_0 - n_m \cos \alpha_2}{n_0 \cos \alpha_0 + n_m \cos \alpha_2} = -\frac{\sin(\alpha_0 - \alpha_2)}{\sin(\alpha_0 + \alpha_2)}. \end{cases} \quad (3.2)$$

Здесь n_0 и n_m - показатели преломления сред, из которой распространяется излучение и в которую оно попадает, $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$ - углы, под которым излучение падает на границу раздела двух сред, отражается и проходит во вторую среду.

Если рассматривать нормальное падение излучения, когда $\alpha_0 = \alpha_1 = \alpha_2$, тогда эти составляющих будут одинаковы, и амплитудные коэффициенты пропускания и отражения можно определить, воспользовавшись зависимостями 3.3 и 3.4.

$$\begin{cases} t_p = \frac{2n_0}{n_0 + n_m}, \\ t_s = \frac{2n_0}{n_0 + n_m}; \end{cases} \quad (3.3)$$

$$\begin{cases} r_p = \frac{n_m - n_0}{n_m + n_0}, \\ r_s = -\frac{n_m - n_0}{n_m + n_0}. \end{cases} \quad (3.4)$$

При этом различие между p - и s -компонентами исчезает и понятие плоскости падения теряет смысл.

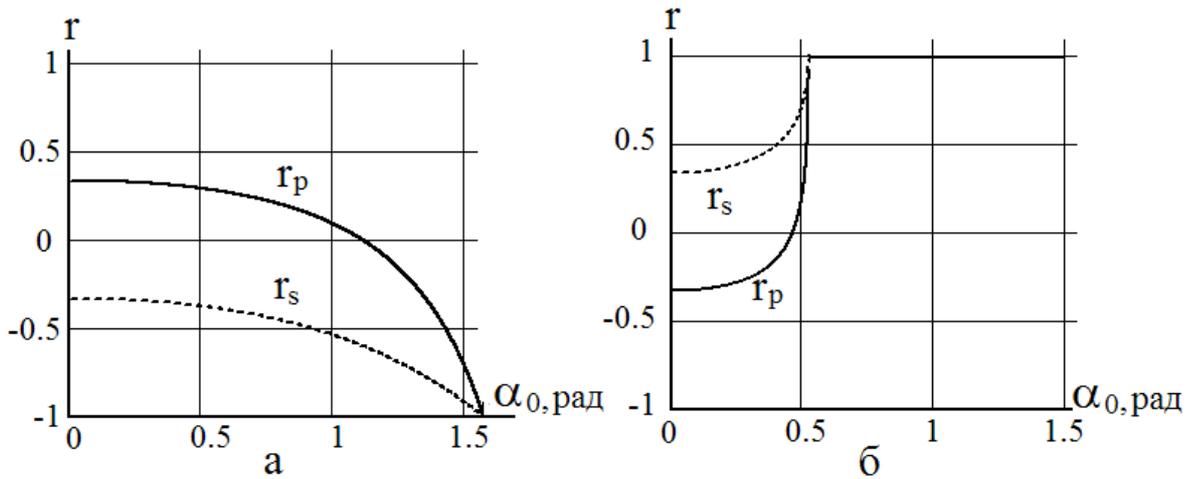


Рис. 3.2. Зависимость амплитудных коэффициентов отражения для света, поляризованного в плоскости и перпендикулярно плоскости падения, от угла падения света на границу раздела двух сред: а – $n_0 < n_m$, $n_0=1, n_m=2$, б - $n_0 > n_m$, $n_0=2, n_m=1$.

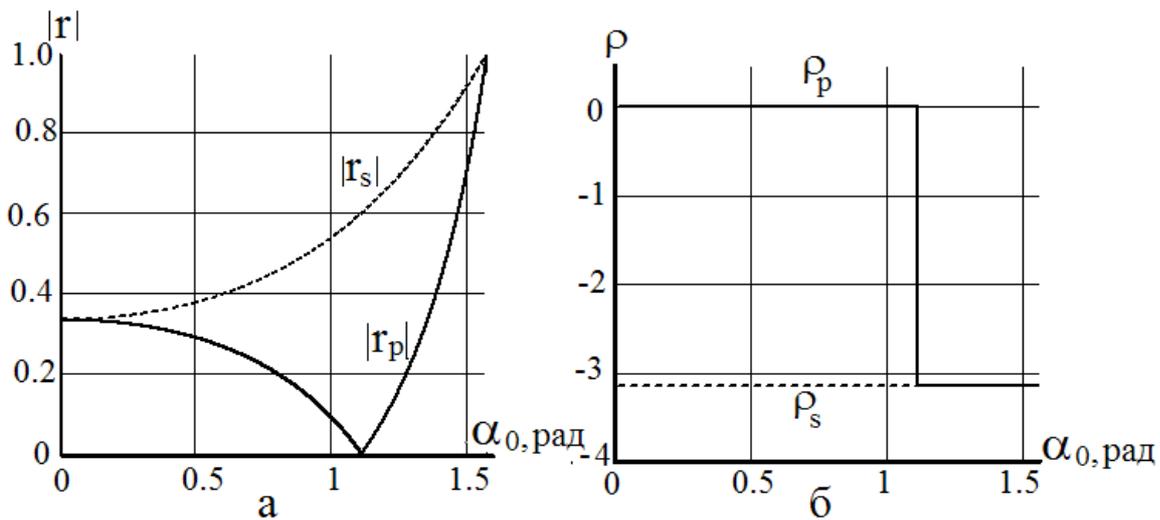


Рис.3.3. Зависимость модуля коэффициента отражения (а) и разности фаз между падающей и отражённой волнами (б) для света, поляризованного в плоскости и перпендикулярно плоскости падения, от угла падения на границу раздела двух сред, $n_0=1, n_m=2$.

Целесообразно для дальнейшего рассмотрения представить амплитудные коэффициенты отражения (3.2) для излучения, поляризованного в разных плоскостях, в унифицированном виде:

$$r_{p,s} = \frac{\hat{n}_j - \hat{n}_{j+1}}{\hat{n}_j + \hat{n}_{j+1}}, \quad \text{где} \quad \hat{n}_j = \begin{cases} n_j \cos \alpha_j & \text{для } s\text{-компоненты} \\ \frac{\cos \alpha_j}{n_j} & \text{для } p\text{-компоненты} \end{cases} \quad (3.5)$$

Зависимость амплитудных коэффициентов отражения для р- и s- компонент от угла падения излучения изображена на рис. 3.2а (свет падает из оптически менее плотной среды $n_0 > n_m$) и рис. 3.2б – (свет падает из оптически более плотной среды). Как видно из этих рисунков, амплитудные коэффициенты отражения могут иметь как положительное, так и отрицательное значение.

Поскольку отрицательное значение коэффициента отражения не имеет физического смысла, то необходимо рассматривать амплитудный коэффициент отражения в виде $r_{p,s} = |r_{p,s}| \exp(i\rho_{p,s})$, где $\rho_{p,s}$ - разность фаз между падающей и отраженной волнами. Зависимость $|r_{p,s}|$ и $\rho_{p,s}$ для падения света из оптически менее плотной среды от угла падения изображена на рис. 3.3.

Эта запись также показывает, что при отражении излучения от границы раздела двух сред происходит не только энергетическое изменение падающего излучения, но и влияние на форму волнового фронта.

Как видно из этого рисунка, зависимость разности фаз между падающей и отражённой волнами для света с разными состояниями поляризации от угла падения при углах падения больших угла Брюстера совпадают.

Интерференционные слои на поверхности оптического стекла

В реальных условиях на границе раздела воздух – оптический материал могут присутствовать слои с разными показателями преломления (трещиноватый и рельефный слои). Также на такие поверхности могут быть нанесены интерференционные слои, как для защиты поверхности от воздействия окружающей среды, так и для изменения оптических свойств поверхности. В оптике наиболее часто рассматриваются полированные

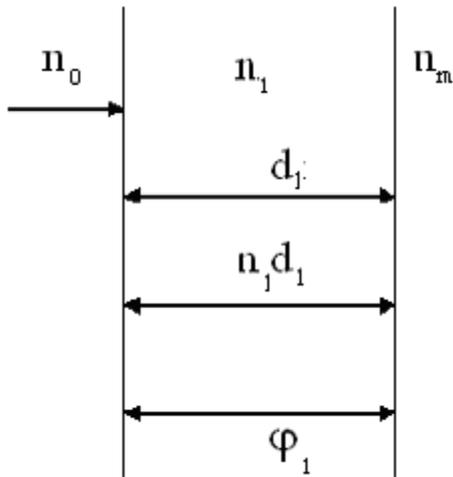


Рис. 3.4. Схема однослойного непоглощающего слоя

поверхности, в таком случае слои имеют толщину меньше рабочей длины волны. Для упрощения проанализируем ситуацию, когда на поверхности оптического элемента присутствует некий изотропный, непоглощающий слой, который характеризуется показателем преломления n_1 , геометрической d_1 , оптической $n_1 d_1$ и фазовой толщиной слоя $\varphi_1 = 2\pi n_1 d_1 (\lambda)^{-1}$ (рис.3.4). Этот слой находится на границе раздела двух сред с различными показателями преломления,

эти среды по отношению к слою являются полубесконечными. Проанализируем, как изменятся свойства границы раздела двух сред. Вначале рассмотрим, что произойдет с этой границей, при условии, что излучение падает по нормали к границе раздела.

Нормальное падение излучения на непоглощающий интерференционный слой

На границе раздела двух сред с показателями преломления n_0 и n_m расположен изотропный, однородный, бесконечно протяженный плоскопараллельный слой, который характеризуется показателем преломления n_1 , геометрической толщиной d_1 , оптической толщиной $n_1 d_1$ и фазовой толщиной $\varphi_1 = 2\pi n_1 d_1 (\lambda)^{-1}$. Наличие этого слоя приводит к образованию двух границ раздела между средами с показателями преломления $n_0 - n_1$ и $n_1 - n_m$. Здесь и далее все показатели преломления рассматриваются без учёта дисперсии.

Амплитудный коэффициент отражения такого слоя в соответствии с (2) будет равен:

$$r = \frac{(n_0 m_{11} - n_m m_{22}) + i(n_0 n_m m_{12} - m_{21})}{(n_0 m_{11} + n_m m_{22}) + i(n_0 n_m m_{12} + m_{21})} \quad (3.6)$$

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

$$m_{11} = m_{22} = \cos \varphi_1 \quad m_{12} = \frac{1}{n_1} \sin \varphi_1 \quad m_{21} = n_1 \sin \varphi_1 \quad (3.7)$$

При записи выражения для определения амплитудного коэффициента отражения в общем случае это будет комплексное число, т.е. это величина $r = |r|e^{-i\varphi}$. Следует помнить, что на одной границе раздела амплитудный коэффициент отражения всегда есть действительное число, оно может быть как положительным, так и отрицательным. Если величина « r » - число положительное, то разность фаз между падающим и отражённым излучением равна нулю, а если отрицательное, то разность фаз будет равна величине π . При отражении от среды с большим показателем преломления излучение теряет половину длины волны, т.е. разность фаз между падающей и отражённой волнами равна « $-\pi$ ». При наличии двух границ раздела фаза есть некое число, отличное от 0 и π , которое меняется в зависимости от длины волны.

Энергетический коэффициент отражения такого слоя есть квадрат модуля амплитудного коэффициента отражения:

$$R = |r|^2 \quad (3.8)$$

Энергетический коэффициент отражения R в этом случае описывается дробно-линейной функцией:

$$R = \frac{(n_0 m_{11} - n_m m_{22})^2 + (n_0 n_m m_{12} - m_{21})^2}{(n_0 m_{11} + n_m m_{22})^2 + (n_0 n_m m_{12} + m_{21})^2} \quad (3.9)$$

Энергетический коэффициент пропускания равен:

$$T = \frac{4n_0 n_m}{(n_0 m_{11} + n_m m_{22})^2 + (n_0 n_m m_{12} + m_{21})^2} \quad (3.10)$$

Эта форма записи является следствием унимодулярности матрицы преобразования. Детерминант матрицы для прозрачных сред равен:

$$m_{11}m_{22} + m_{12}m_{21} = 1 \quad (3.11)$$

В общем случае, когда в слое присутствует поглощение, а это возможно, когда в нарушенный слой попадают вещества, непрозрачные в рабочем диапазоне спектра, это утверждение не верно, все элементы матрицы, характеризующей поглощающий слой, комплексные числа. Зависимости энергетических коэффициентов отражения и пропускания слоя, сформированного на оптическом элементе, изготовленном из материала, показатель преломления которого равен величине n_m , от толщины слоя изображены на рис.3.5. На этом рисунке представлены зависимости энергетического коэффициента отражения для слоёв, сформированных из материалов с различными соотношениями между показателями преломления показателями преломления материала, из которого изготовлен оптический элемент и слой.

Далее рассмотрим спектральные зависимости энергетического коэффициента отражения (пропускания) оптического элемента, на котором сформирован слой. Спектральную зависимость целесообразно рассматривать для слоя постоянной толщины, т.е. когда он окончательно сформирован. Для определённости положим, что $n_1d_1 = \lambda_0/4$, т.е. на длине волны $\lambda = \lambda_0$ будет наблюдаться либо минимум, либо максимум в зависимости от соотношения показателей преломления материалов, из которых сформированы оптический элемент и слой.

На рис. 3.6 показаны спектральные зависимости энергетических коэффициентов отражения и пропускания в достаточно широком диапазоне длин волн. Экстремумы энергетических коэффициентов отражения и пропускания наблюдается при фазовой толщине слоя, равной $\pi/2$, и, соответственно, длине волны, которая соответствует максимуму отражения, и могут быть легко найдены из выражения для фазовой толщины слоя. В случае, когда фазовая толщина слоя, т.е. $\varphi_1 = 2\pi n_1 d_1 \lambda^{-1} = 0,5\pi \lambda_0 \lambda^{-1} = 0,5\pi$, энергетический коэффициент отражения имеет максимальное или минимальное значение на длине волны, равной λ_0 , в зависимости от соотношений показателей преломления слоя и материала оптического

элемента. Если фазовая толщина слоя π , то длина волны, для которой наблюдается этот экстремум отражения, будет равна $\lambda_0/2$. На графике отмечены точки, соответствующие экстремумам.

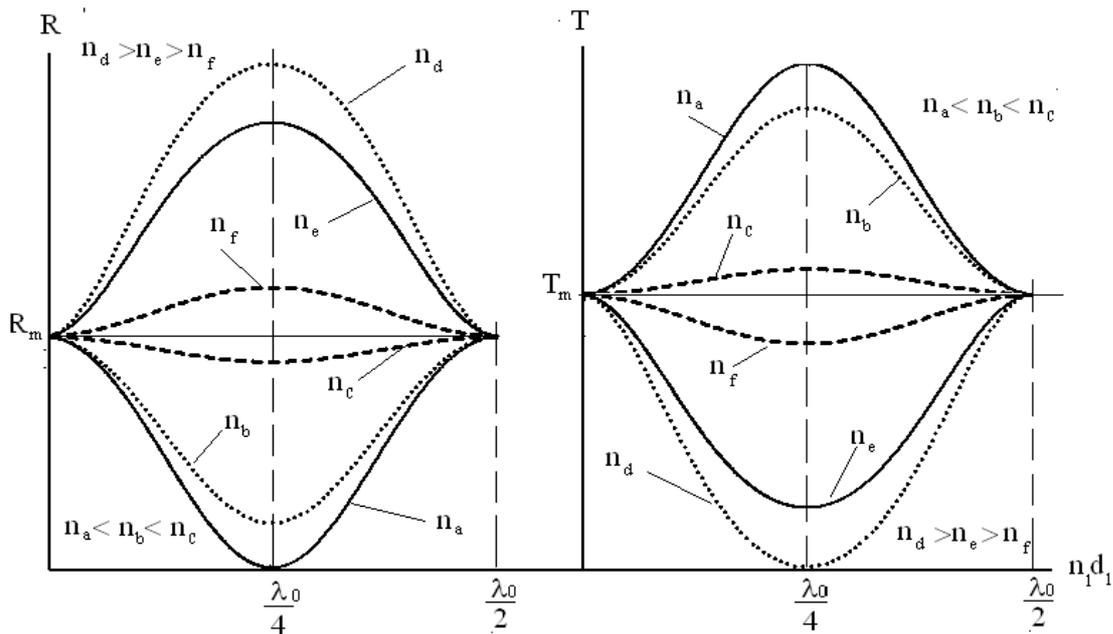


Рис. 3.5. Зависимость энергетических коэффициентов отражения и пропускания от толщины слоя при различных значениях показателя преломления этого слоя. Показатели преломления слоя n_a, n_b, n_c находятся в интервале (n_0, n_m) , показатели преломления n_d, n_e, n_f больше чем показатель преломления подложки (n_m).

Очевидно, что на длине волны λ_0 будет наблюдаться один экстремум, а на длине волны $\lambda_0/2$ - другой. Проанализируем, какой вид будет иметь спектральная характеристика в длинноволновой и коротковолновой области спектра. Вначале необходимо определить, чему соответствует длинноволновая область спектра в диапазоне фазовых толщин. Это область соответствует фазовым толщинам, величина которых находится в интервале от 0 до $\pi/2$. Фазовая толщина, равная нулю, соответствует длине волны, находящейся в бесконечности. 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 $\pi/2$, соответствует коротковолновой части спектра. В коротковолновой части спектра спектральная зависимость энергетического коэффициента отражения будет представлять некую функцию с убывающими интервалами, где коэффициент отражения осциллирует. Экстремумы, соответствующие фазовым толщинам, кратным нечётному числу величины $\pi/2$, будут наблюдаться на длинах волн $\lambda_0(2k+1)^{-1}$, а чётному - $\lambda_0(2k)^{-1}$, $k=0,1,2,\dots$.

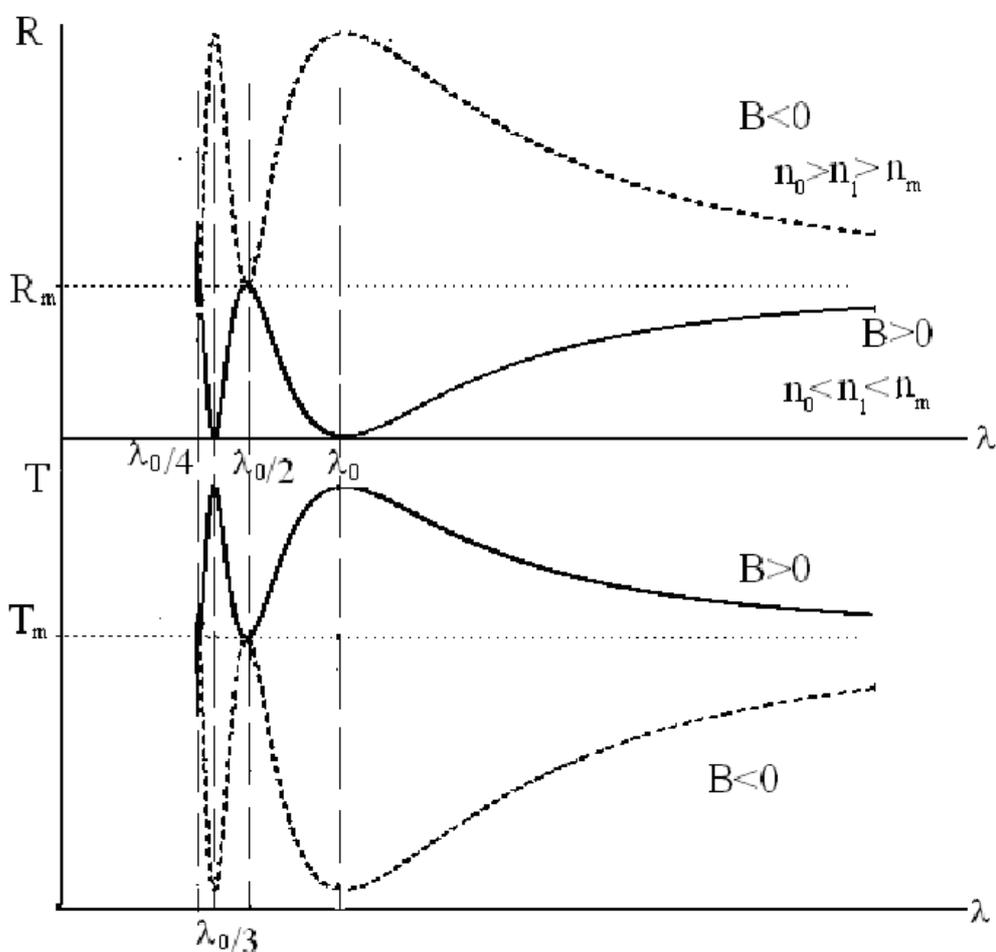


Рис.3.6. Спектральные зависимости энергетических коэффициентов отражения и пропускания слоя, показатель преломления которого лежит в интервале $n_0 < n_1 < n_m$ ($B > 0$) и $n_1 > n_m$ ($B < 0$), $n_0 < n_m$.

Однослойные интерференционные покрытия при наклонном падении излучения

Рассмотрим теперь оптические свойства однослойного покрытия, сформированного на оптическом элементе, при наклонном падении излучения. Пусть плоская волна падает под некоторым углом α_0 на слой, расположенный на границе раздела двух сред с показателями преломления n_0 и n_m . Показатель преломления среды, из которой падает излучение n_0 , показатель преломления материала, из которого изготовлен слой, n_1 , показатель преломления среды, в которой излучение распространяется - n_m . Геометрическая толщина слоя d_1 , оптическая толщина слоя $n_1 d_1$, фазовая толщина слоя при нормальном падении $\varphi_1 = 2\pi n_1 d_1 (\lambda)^{-1}$. Излучение начинает падать под углом α_0 , при этом меняется разность хода между интерферирующими лучами в этом слое и, кроме того, меняется коэффициент отражения на границах раздела сред. Фазовая толщина слоя становится равной $\varphi_{1\alpha} = 2\pi n_1 d_1 (\lambda)^{-1} \cos \alpha_1$, где угол α_1 – угол распространения излучения в слое, этот угол легко определяется из закона Снеллиуса: $n_0 \sin \alpha_0 = n_1 \sin \alpha_1$.

Рассмотрим рекуррентный метод расчёта коэффициента отражения на границе двух сред. Граница раздела сред, с показателями преломления n_0 и n_1 , характеризуется коэффициентом отражения r_1 , граница раздела сред n_1 и n_m характеризуется коэффициентом отражения r_2 . Это френелевские коэффициенты отражения, которые могут быть определены из следующих соотношений:

$$r_1^{p,s} = \frac{\tilde{n}_0 - \tilde{n}_1}{\tilde{n}_0 + \tilde{n}_1}, \quad r_2^{p,s} = \frac{\tilde{n}_1 - \tilde{n}_m}{\tilde{n}_1 + \tilde{n}_m}, \quad (3.12)$$

где “ \tilde{n} ” обозначает, что показатель преломления сред при наклонном падении излучения должен быть заменён на эффективный показатель преломления, который для разных состояний поляризаций имеет следующее значение:

$$\tilde{n}_i = \begin{cases} n_i \cos \alpha_i & \text{s – поляризации,} \\ n_i^{-1} \cos \alpha_i & \text{p – поляризации.} \end{cases} \quad i = 0, 1, m. \quad (3.13)$$

Изменение амплитудного коэффициента отражения от угла падения излучения для этих границ раздела показано на рис.3.7.

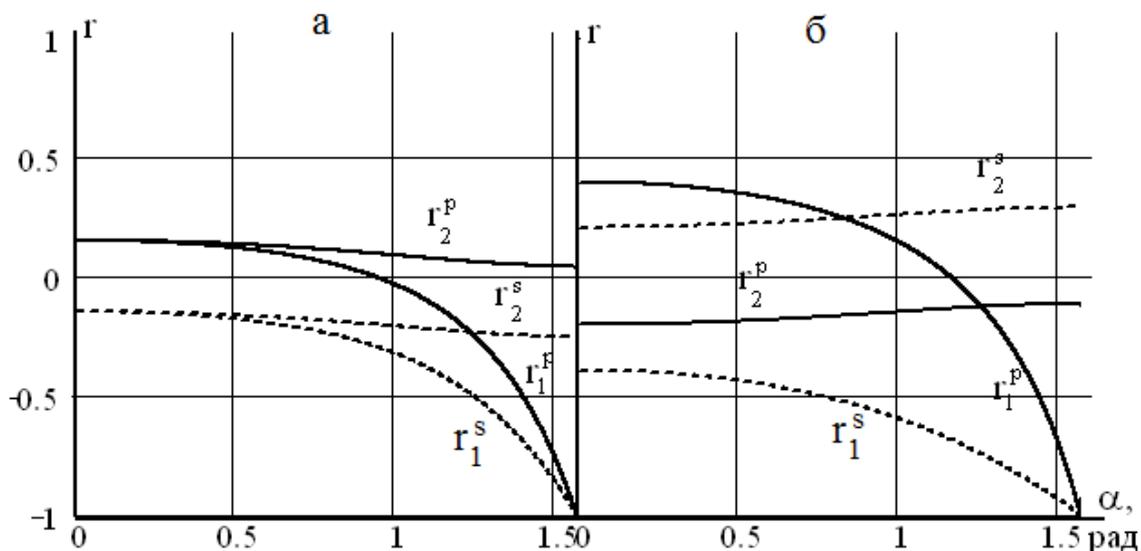


Рис. 3.7. Амплитудные коэффициенты отражения границ раздела двух сред для излучения, поляризованного в плоскости - r_p и перпендикулярно плоскости - r_s падения для первой и второй границ раздела (а) сред с показателями преломления: $n_0=1$, $n_1=1,35$, $n_m=1.52$, (б) - $n_0 = 1$, $n_1=2.30$, $n_m=1.52$.

Пересечение кривой, отражающей характер изменения амплитудного коэффициента отражения, с осью абсцисс соответствует углу Брюстера. Далее посмотрим, как будет меняться коэффициент отражения на границе раздела двух сред с разными показателями преломления при изменении угла падения излучения на слой. Пусть излучение падает из среды оптически менее плотной в среду оптически более плотную, а показатель преломления n_1 может иметь любое значение, его величина может быть как больше показателя преломления оптического элемента, так и меньше показателя преломления материала, из которого изготовлен оптический элемент (рис.3.7). Эта ситуация достаточно интересна, поскольку при формировании слоя из материала, у которого показатель преломления меньше, чем у оптического элемента, энергетический коэффициент отражения системы уменьшается по мере увеличения толщины слоя, а если мы наносим слой с большим показателем преломления, то наблюдается

обратная ситуация, т.е. энергетический коэффициент отражения увеличивается.

Посмотрим, что будет происходить в ситуации, когда $n_1 < n_m$ (рис.3.7а). При наклонном падении излучения на первую границу раздела излучение падает из оптически менее плотной среды в оптически более плотную среду ($n_0 < n_1$), на второй границе раздела ситуация аналогичная ($n_1 < n_m$). Т.е. здесь свет также падает из оптически менее плотной среды в оптически более плотную среду. Здесь разница между коэффициентами r_1 и r_2 будет только в величине.

Если показатель преломления материала, из которого изготовлен слой, больше показателя преломления материала, из которого изготовлен оптический элемент ($n_1 > n_m$), то при наклонном падении излучения характер изменения амплитудных коэффициентов отражения на первой и второй границах раздела будут различаться не только величиной, но и знаком (рис. 3.7б). Амплитудный коэффициент отражения слоя равен:

$$r^{p,s} = \frac{r_1^{p,s} + r_2^{p,s} \exp(2i\tilde{\varphi}_1)}{1 + r_1^{p,s} r_2^{p,s} \exp(2i\tilde{\varphi}_1)}$$

или

$$r^{p,s} = \frac{\frac{\tilde{n}_0^{p,s} - \tilde{n}_1^{p,s}}{\tilde{n}_0^{p,s} + \tilde{n}_1^{p,s}} - \frac{\tilde{n}_1^{p,s} - \tilde{n}_m^{p,s}}{\tilde{n}_1^{p,s} + \tilde{n}_m^{p,s}} \exp(2i\tilde{\varphi}_1)}{1 + \frac{\tilde{n}_0^{p,s} - \tilde{n}_1^{p,s}}{\tilde{n}_0^{p,s} + \tilde{n}_1^{p,s}} \times \frac{\tilde{n}_1^{p,s} - \tilde{n}_m^{p,s}}{\tilde{n}_1^{p,s} + \tilde{n}_m^{p,s}} \exp(2i\tilde{\varphi}_1)}}{(3.14)}$$

Минимальное значение коэффициента отражения для любой поляризации наблюдается при $\tilde{\varphi}_1 = \pi$. Подставив соответствующие значения показателя преломления, получаем:

$$R_{\min} = \left(\frac{\tilde{n}_1^2 - \tilde{n}_0 \tilde{n}_m}{\tilde{n}_1^2 + \tilde{n}_0 \tilde{n}_m} \right)^2.$$

Далее, целесообразно написать выражения для коэффициента отражения каждой из компонент:

$$\begin{cases} R_{p\min} = \frac{n_1^2 \cos \alpha_0 \cos \alpha_m - n_0 n_m \cos^2 \alpha_1}{n_1^2 \cos \alpha_0 \cos \alpha_m + n_0 n_m \cos^2 \alpha_1} - & \text{p поляризация;} \\ R_{s\min} = \frac{n_1^2 \cos^2 \alpha_1 - n_0 n_m \cos \alpha_0 \cos \alpha_m}{n_1^2 \cos^2 \alpha_1 + n_0 n_m \cos \alpha_0 \cos \alpha_m} - & \text{s поляризация.} \end{cases} \quad (3.15)$$

Здесь представлены значения коэффициентов отражения для излучения с разными состояниями поляризации. Отсюда видно, что если выполняется условие $n_0 n_m = n_1^2$, то амплитудные коэффициенты отражения в минимуме совпадают с точностью до знака. Модули амплитудных коэффициентов отражения одинаковые, они отличаются только фазой, т.е. разностью фаз между падающим и отражённым излучением для света с разными состояниями поляризации. Эти фазы будут отличаться на величину π . При этом:

$$r_{p\min} = -r_{s\min} = \frac{\cos \alpha_0 \cos \alpha_m - \cos^2 \alpha_1}{\cos \alpha_0 \cos \alpha_m + \cos^2 \alpha_1}, \text{ а}$$

$$R_{p\min} = R_{s\min} = \left(\frac{n_0 \sqrt{n_m^2 - n_0^2 \sin^2 \alpha_0} \cdot \cos \alpha_0 + n_0^2 \sin^2 \alpha_0 - n_0 n_m}{n_0 \sqrt{n_m^2 - n_0^2 \sin^2 \alpha_0} \cdot \cos \alpha_0 - n_0^2 \sin^2 \alpha_0 + n_0 n_m} \right)^2. \quad (3.16)$$

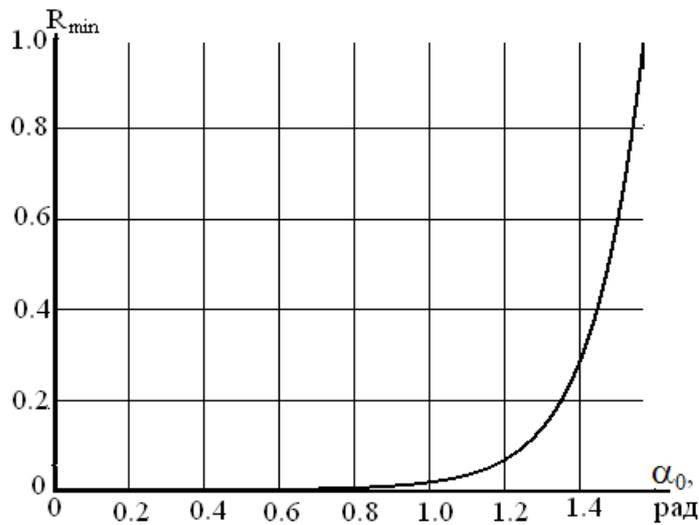


Рис. 3.8. Зависимость минимального коэффициента отражения однослойного просветляющего покрытия, оптическая толщина которого меняется пропорционально $(\cos \alpha_0)^{-1}$, а показатель преломления слоя $(n_0 n_m)^{-0.5}$ от угла падения излучения.

На рис. 3.8 представлена зависимость изменения энергетического коэффициента отражения от угла падения излучения для случая, когда между показателями преломления сред выполняется соотношение $n_0 n_m = n_1^2$. Если условие $n_1^2 = n_0 n_m$ не выполняется, амплитудные коэффициенты отражения для излучения с разными состояниями поляризации будут отличаться, действительно:

$$\left\{ \begin{array}{l} r_s = \frac{\frac{n_0 \cos \alpha_0 - n_1 \cos \alpha_1}{n_0 \cos \alpha_0 + n_1 \cos \alpha_1} - \frac{n_1 \cos \alpha_1 - n_m \cos \alpha_m}{n_1 \cos \alpha_1 + n_m \cos \alpha_m} \exp(2i\tilde{\varphi}_1)}{1 + \frac{n_0 \cos \alpha_0 - n_1 \cos \alpha_1}{n_0 \cos \alpha_0 + n_1 \cos \alpha_1} \times \frac{n_1 \cos \alpha_1 - n_m \cos \alpha_m}{n_1 \cos \alpha_1 + n_m \cos \alpha_m} \exp(2i\tilde{\varphi}_1)}, \\ r_p = \frac{\frac{n_1 \cos \alpha_0 - n_0 \cos \alpha_1}{n_1 \cos \alpha_0 + n_0 \cos \alpha_1} - \frac{n_m \cos \alpha_1 - n_1 \cos \alpha_m}{n_m \cos \alpha_1 + n_1 \cos \alpha_m} \exp(2i\tilde{\varphi}_1)}{1 + \frac{n_1 \cos \alpha_0 - n_0 \cos \alpha_1}{n_1 \cos \alpha_0 + n_0 \cos \alpha_1} \times \frac{n_m \cos \alpha_1 - n_1 \cos \alpha_m}{n_m \cos \alpha_1 + n_1 \cos \alpha_m} \exp(2i\tilde{\varphi}_1)}. \end{array} \right. \quad (3.17)$$

Отсюда видно, что для света с разными состояниями поляризации коэффициенты отражения отличаются.

Рассмотрим, как влияет угол падения излучения на спектральную кривую отражённого излучения. При нормальном падении излучения спектральная характеристика энергетического коэффициента отражения определяется следующей зависимостью:

$$R = \frac{\left(\frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1}\right)^2 + \left(\frac{n_1 - n_m}{n_1 + n_m}\right)^2 - 2\left(\frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1}\right)\left(\frac{n_1 - n_m}{n_1 + n_m}\right)\cos 2\varphi_1}{1 + \left(\frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1}\right)^2 + \left(\frac{n_1 - n_m}{n_1 + n_m}\right)^2 - 2\left(\frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1}\right)\left(\frac{n_1 - n_m}{n_1 + n_m}\right)\cos 2\varphi_1}. \quad (3.18)$$

При фазовой толщине слоя $\varphi_1 = 0,5\pi(2k+1)$ наблюдается экстремум энергетического коэффициента отражения, равный величине $(n_1^2 - n_0 n_m)^2 (n_1^2 + n_0 n_m)^{-2}$.

По мере увеличения угла падения будет изменяться величина фазовой толщины слоя $\varphi_1 = 2\pi n_1 d_1 \lambda^{-1} \cos \alpha_1$. Если предположить, что оптическая толщина слоя равна $\lambda_0/4$, то фазовая толщина слоя может быть записана в виде: $\varphi_1 = \pi \lambda_0 (2\lambda)^{-1} \cos \alpha_1$. Угол распространения излучения в слое может

быть определён из закона Снеллиуса, тогда $\varphi_1 = \pi\lambda_0 (2\lambda)^{-1} \cos(\arcsin(n_0 n_1^{-1} \sin \alpha_0))$. Условие экстремума отражения в этом случае естественно выполняется тогда, когда $\varphi_1 = 0.5\pi$. Длина волны, при которой будет наблюдаться экстремум отражения при наклонном падении, в соответствии с этим равна:

$$\lambda = \lambda_0 \cos(\arcsin(n_0 n_1^{-1} \sin \alpha_0)). \quad (3.19)$$

При наклонном падении излучения спектральные зависимости энергетического коэффициента отражения для разных состояний поляризации излучения будут различны. Как видно из рисунка 3.9, энергетический коэффициент отражения всегда больше для излучения, поляризованного в плоскости падения, чем для излучения, поляризованного в плоскости, перпендикулярной плоскости падения. Анализ спектральных характеристик энергетического коэффициента отражения для различных поляризаций был рассмотрена на основе рекуррентных соотношений. Далее рассмотрим влияние наклонного падения излучения на слой, используя матричные соотношения. Матрица интерференции для такой системы имеет следующий вид [7]:

$$\begin{vmatrix} \cos \tilde{\varphi}_1 & \frac{1}{\tilde{n}_1} \sin \tilde{\varphi}_1 \\ \tilde{n}_1 \sin \tilde{\varphi}_1 & \cos \tilde{\varphi}_1 \end{vmatrix},$$

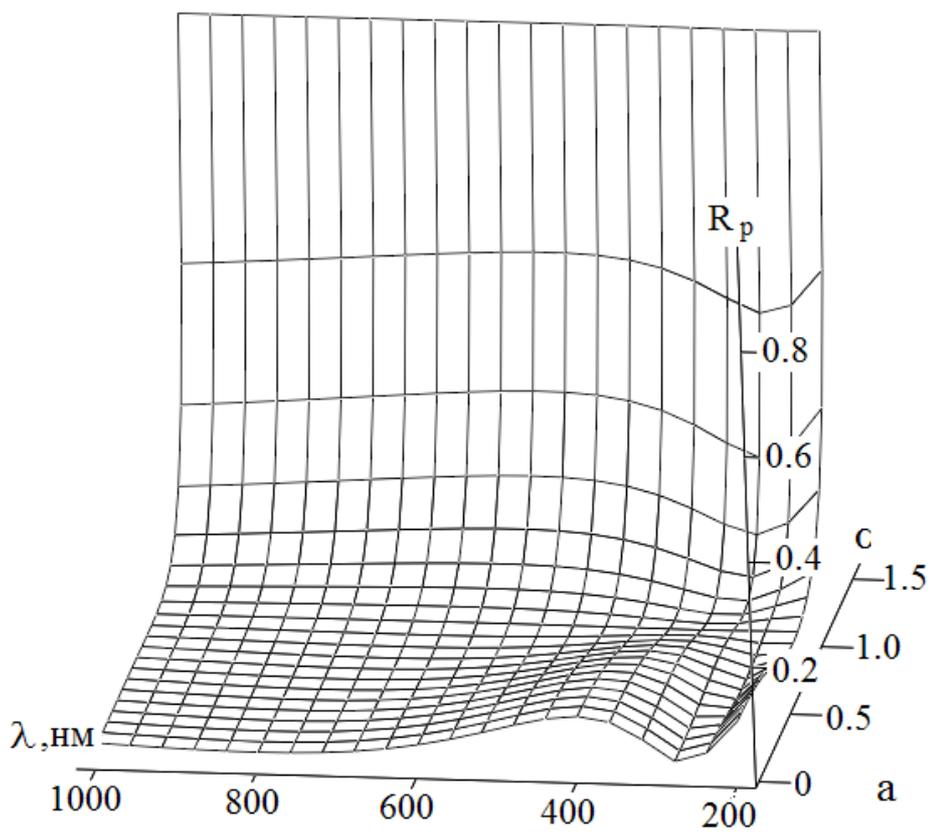
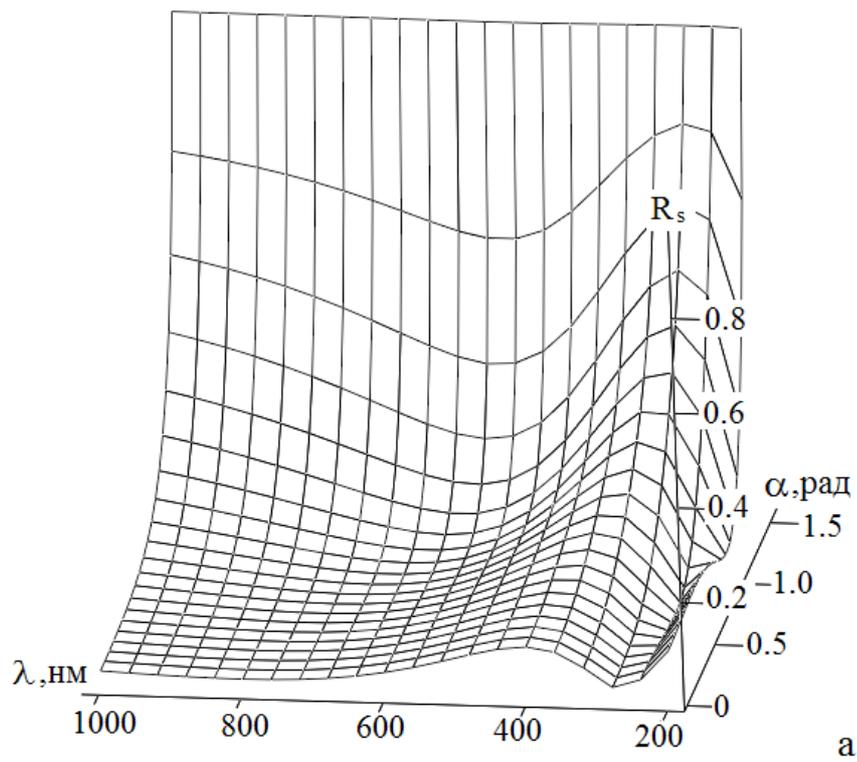
где:

$$\tilde{n}_1 = \begin{cases} n_1 \cos \alpha_1 & \text{s – поляризация} \\ n_1^{-1} \cos \alpha_1 & \text{p – поляризация,} \end{cases} \quad (3.20)$$

$$\varphi_1 = \pi\lambda_0 (2\lambda)^{-1} \cos \alpha_1,$$

если, по-прежнему считать, что оптическая толщина слоя $n_1 d_1 = \lambda_0 / 4$, то амплитудный коэффициент отражения для такой системы имеет вид:

$$r = \frac{(n_0 m_{11} - n_m m_{22}) + i(n_0 n_m m_{12} - m_{21})}{(n_0 m_{11} + n_m m_{22}) + i(n_0 n_m m_{12} + n_1 m_{21})}.$$



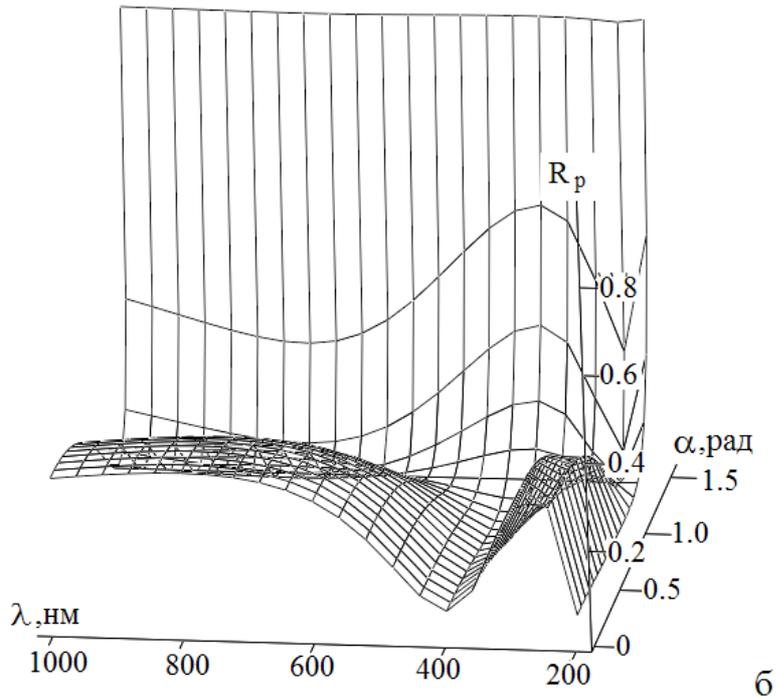
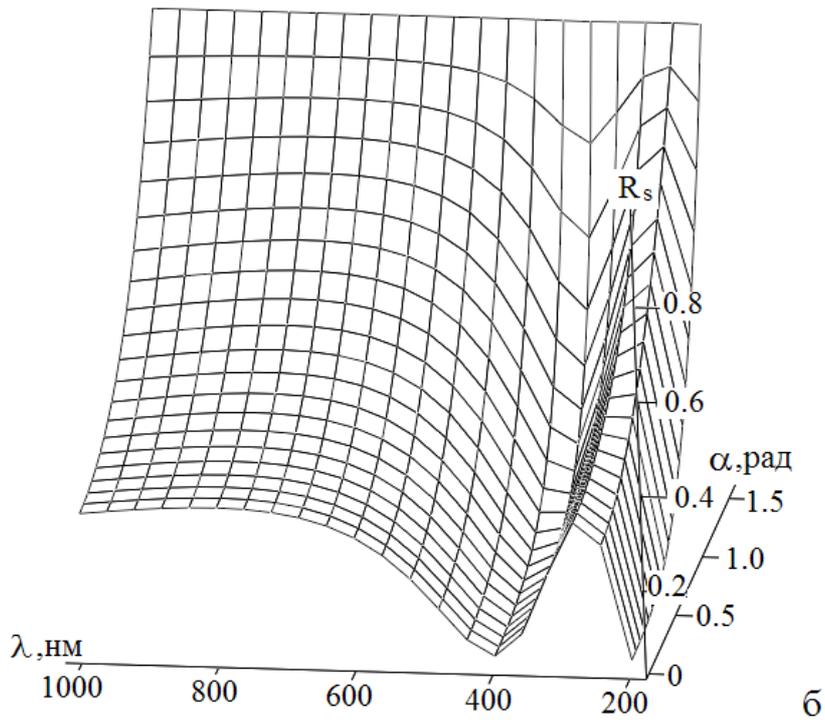


Рис. 3.9. Зависимость энергетического коэффициента отражения от длины волны и угла падения излучения на слой при разных значениях показателя преломления слоя а - $n_1 < n_m$, $n_1 = 1.35$, $n_m = 1,8225$; б - $n_1 > n_m$, $n_1 = 2.4$, $n_m = 1.50$, $n_1 d_1 = 0.25 \lambda_0$, $\lambda_0 = 800 \text{ нм}$. волны,

$$\lambda = \lambda_0 \cos(\arcsin(n_0 n_1^{-1} \sin \alpha_0)).$$

Для света, поляризованного в разных плоскостях, при наклонном падении излучения:

$$\begin{cases} r^s = \frac{(n_0^s m_{11} - n_m^s m_{22}) + i(n_0^s n_m^s m_{12} - m_{21})}{(n_0^s m_{11} + n_m^s m_{22}) + i(n_0^s n_m^s m_{12} + n_1^s m_{21})}, \\ r^p = \frac{(n_0^p m_{11} - n_m^p m_{22}) + i(n_0^p n_m^p m_{12} - m_{21})}{(n_0^p m_{11} + n_m^p m_{22}) + i(n_0^p n_m^p m_{12} + n_1^p m_{21})}. \end{cases} \quad (3.21)$$

Эти зависимости амплитудного коэффициента отражения представлены через элементы матрицы интерференции. Определим значения амплитудных коэффициентов отражения через фазовую толщину слоя и эффективные показатели преломления сред. Как видно из этой записи, величины амплитудных коэффициентов отражения для s и p компонент несколько отличаются друг от друга. Данные зависимости более наглядно показывают, чем рассмотренные ранее, что экстремумы амплитудных коэффициентов отражения для s и p компонент будут находиться на разных длинах волн.

$$\begin{cases} r^s = \frac{(n_0 \cos \alpha_0 - n_m \cos \alpha_m) \cos \tilde{\varphi}_1 + i \left(\frac{n_0 n_m \cos \alpha_0 \cos \alpha_m}{n_1 \cos \alpha_1} - n_1 \cos \alpha_1 \right) \sin \tilde{\varphi}_1}{(n_0 \cos \alpha_0 + n_m \cos \alpha_m) \cos \tilde{\varphi}_1 + i \left(\frac{n_0 n_m \cos \alpha_0 \cos \alpha_m}{n_1 \cos \alpha_1} + n_1 \cos \alpha_1 \right) \sin \tilde{\varphi}_1} \\ r^p = \frac{\left(\frac{\cos \alpha_0}{n_0} - \frac{\cos \alpha_m}{n_m} \right) \cos \tilde{\varphi}_1 + i \left(\frac{\cos \alpha_0 \cos \alpha_m}{n_0 n_m \cos \alpha_1} - \frac{\cos \alpha_1}{n_1} \right) \sin \tilde{\varphi}_1}{\left(\frac{\cos \alpha_0}{n_0} + \frac{\cos \alpha_m}{n_m} \right) \cos \tilde{\varphi}_1 + i \left(\frac{\cos \alpha_0 \cos \alpha_m}{n_0 n_m \cos \alpha_1} + \frac{\cos \alpha_1}{n_1} \right) \sin \tilde{\varphi}_1}. \end{cases}$$

Воспользовавшись полученными выражениями для амплитудного коэффициента отражения, можно легко определить энергетический коэффициент отражения: $R = |r|^2$.

Оптические характеристики интерференционного поглощающего слоя

Определим оптические характеристики излучения, отражённого и прошедшего через покрытие, обладающего поглощением излучения

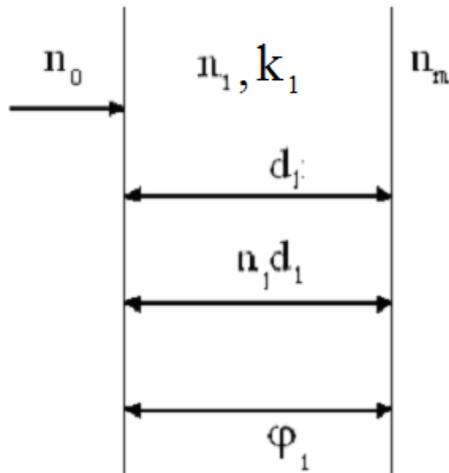


Рис.3.10. Схема однослойного поглощающего покрытия.

Такой слой характеризуется показателем преломления n_1 , коэффициентом поглощения, геометрической d_1 , оптической $(n_1 - k_1)d_1$ и фазовой толщиной слоя $\varphi_1 = 2\pi(n_1 - k_1)d_1(\lambda)^{-1}$ (рис.3.10). Плоская волна падает на такую систему по нормали, все ограничения остаются: слой бесконечно протяжённый, волновой фронт тоже бесконечно протяжённый, слой однородный, изотропный, по толщине слоя показатель преломления и поглощения

не меняются. Когда излучение попадает на первую границу раздела, 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, получают все время ослабляющиеся пучки. В этом случае, амплитудный коэффициент отражения излучения слоем:

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

где: r_1, r_2 – френелевские коэффициенты отражения на первой и на второй границах раздела:

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

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

Здесь, в отличие от ранее рассмотренной ситуации, амплитудные коэффициенты отражения являются комплексными величинами, т.е. эти величины могут быть записаны в следующем виде

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

Величины ρ_1 и ρ_2 будут аргументами функций r_1 и r_2 .

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

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

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

Значение амплитудного коэффициента отражения определяется из следующей зависимости:

$$r = \frac{|r_1| e^{i\rho_1} + |r_2| \exp(-2i(2\pi n_1 d_1 \lambda^{-1} + \rho_2)) \exp(-4\pi k_1 d_1 \lambda^{-1})}{1 + |r_1| |r_2| \exp(-2i(2\pi n_1 d_1 \lambda^{-1} + \rho_2 + \rho_1)) \exp(-4\pi k_1 d_1 \lambda^{-1})}. \quad (3.22)$$

Выражение (3.22) показывает, что в отличие от непоглощающей системы, перед фазовым множителем присутствует ещё один множитель, который определяет ослабление амплитуды излучения, проходящего через слой. Учитывая 3.22, можно написать выражения, определяющие энергетический коэффициент отражения и энергетический коэффициент пропускания для поглощающего слоя:

$$R = |r|^2 = \frac{|r_1|^2 - 2|r_1||r_2| \exp\left(-\frac{4\pi k_1 d_1}{\lambda}\right) \times \cos\left(\frac{4\pi n_1 d_1}{\lambda} + \rho_2 + \rho_1\right) + |r_2| \exp\left(-\frac{8\pi k_1 d_1}{\lambda}\right)}{1 + |r_1||r_2| \exp\left(-\frac{8\pi k_1 d_1}{\lambda}\right) - 2|r_1||r_2| \exp\left(-\frac{4\pi k_1 d_1}{\lambda}\right) \times \cos\left(\frac{4\pi n_1 d_1}{\lambda} + \rho_2 + \rho_1\right)} \quad (3.23)$$

$$T = \frac{n_m}{n_0} |t|^2:$$

$$T = \frac{A \exp\left(-\frac{2\pi k_1 d_1}{\lambda}\right)}{1 + |r_1|^2 |r_2|^2 \exp\left(-\frac{8\pi k_1 d_1}{\lambda}\right) - 2|r_1||r_2| \exp\left(-\frac{4\pi k_1 d_1}{\lambda}\right) \cos\left(\frac{4\pi n_1 d_1}{\lambda} + \rho_1 + \rho_2\right)}, \quad (3.24)$$

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

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

Анализ этих выражений показывает, что экстремумы энергетического коэффициента отражения и экстремумы энергетического 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. Поскольку это достаточно громоздкие выражения, приводить их не стоит, но они подтверждают вышеупомянутое высказывание.

Для непоглощающего слоя ситуация значительно проще. Действительно, закон сохранения энергии можно записать в следующем виде:

$$T + R = 1$$

Для экстремумов отражения и пропускания получим после дифференцирования:

$$\frac{dR}{d\lambda} = -\frac{dT}{d\lambda},$$

приравнявая нулю производные, видим, что расположение экстремумов в шкале длин волн совпадает.

В случае поглощающего слоя происходит смещение минимумов энергетического коэффициента отражения относительно энергетического

коэффициента максимумов пропускания. В этом легко убедиться, рассмотрев закон сохранения энергии для такой системы:

$R + T + A = 1$, где A - энергетический коэффициент поглощения.

Продифференцируем это выражение по длине волны.

$$\frac{dT}{d\lambda} + \frac{dR}{d\lambda} + \frac{dA}{d\lambda} = 0,$$

если $\frac{dR}{d\lambda} = 0$, то $\frac{dT}{d\lambda} = -\frac{dA}{d\lambda}$.

Аналогичный результат легко может быть получен с использованием матричного представления.

Фазовая толщина слоя при наличии поглощения:

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

Все элементы матрицы интерференции становятся комплексными величинами:

$$\begin{aligned} m_{11} = m_{22} &= \cos \varphi_1 = \cos \left(\frac{2\pi(n_1 - ik_1)d_1}{\lambda} \right) = \cos \left(\frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} - \frac{2i\pi d_1 k_1}{\lambda} \right), \\ m_{12} &= \frac{1}{\tilde{n}_1} \sin \varphi_1 = \frac{1}{(n_1 - ik_1)} \sin \left(\frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} - \frac{2i\pi d_1 k_1}{\lambda} \right), \\ m_{21} &= \tilde{n}_1 \sin \varphi_1 = (n_1 - ik_1) \sin \left(\frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} - \frac{2i\pi d_1 k_1}{\lambda} \right). \end{aligned} \quad (3.25)$$

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

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

$$m_{12} =$$

$$= \frac{1}{n_1^2 + k_1^2} \left[\left(n_1 \sin \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \operatorname{ch} \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \cdot \frac{k_1}{n_1} + k_1 \cos \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \operatorname{sh} \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \cdot \frac{k_1}{n_1} \right) - \right. \\ \left. - i \left(n_1 \cos \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \operatorname{sh} \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \cdot \frac{k_1}{n_1} - k_1 \sin \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \operatorname{ch} \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \cdot \frac{k_1}{n_1} \right) \right],$$

$$m_{21} = n_1 \sin \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \operatorname{ch} \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \cdot \frac{k_1}{n_1} - k_1 \cos \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \operatorname{sh} \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \cdot \frac{k_1}{n_1} - i \left(n_1 \cos \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \operatorname{sh} \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \cdot \frac{k_1}{n_1} + k_1 \sin \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \operatorname{ch} \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \cdot \frac{k_1}{n_1} \right). \quad (3.26)$$

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

$$\begin{cases} r = \frac{(n_0 - n_m) m_{11} + i(n_0 n_m m_{12} - m_{21})}{(n_0 + n_m) m_{11} + i(n_0 n_m m_{12} + m_{21})}, \\ t = \frac{2n_0}{(n_0 + n_m) m_{11} + i(n_0 n_m m_{12} + m_{21})}. \end{cases} \quad (3.27)$$

Энергетические коэффициенты отражения, пропускания и поглощения:

$$\begin{cases} R = |r|^2, \\ T = \frac{n_m}{n_0} |t|^2, \\ A = 1 - R - T. \end{cases} \quad (3.28)$$

Анализ выражений для энергетических коэффициентов отражения, пропускания и поглощения слоя при наличии в нём поглощения в общем виде, ввиду громоздкости выражений (3.24), (3.25) и (3.26), представляет значительные сложности. Рассмотрим слои, которые имеют предельные значения коэффициента поглощения.

Вначале рассмотрим случай, когда коэффициент поглощения слоя большой, т.е. когда величина $k_1 \gg 1$. В этом случае энергетический коэффициент отражения равен коэффициенту отражения передней границы раздела (3.23). Энергетический коэффициент отражения равен r_1^2 , вторая граница раздела практически не работает, свет полностью поглощается в слое. Энергетический коэффициент отражения определяется только оптическими постоянными слоя, именно так работают металлические зеркала. Работает только первая граница раздела, никаких интерференционных эффектов в этой плёнке не наблюдается, поскольку всё

определяется экспоненциальным множителем в (3.23). Для того, чтобы 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} .

Энергетические коэффициенты отражения и поглощения тонкой плёнки при падении излучения со стороны среды с показателем преломления n_0 равны:

$$\begin{cases} R = \frac{(n_0 - n_1)^2 + k_1^2}{(n_0 + n_1)^2 + k_1^2}, \\ A = \frac{4n_0 n_1}{(n_0 + n_1)^2 + k_1^2}. \end{cases} \quad (3.29)$$

Очевидно, что если излучение падает со стороны оптического элемента, изготовленного из материала, имеющего показатель преломления n_m , то

$$\begin{cases} R' = \frac{(n_m - n_1)^2 + k_1^2}{(n_m + n_1)^2 + k_1^2}, \\ A' = \frac{4n_0 n_1}{(n_m + n_1)^2 + k_1^2}. \end{cases} \quad (3.30)$$

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 достаточно тонких слоёв, когда $\varphi_1 = 2\pi d_1 n_1 \lambda^{-1} \ll 1$, элементы матрицы интерференции, характеризующие такой слой, имеют вид:

$$\begin{cases} m_{11} = m_{22} \approx 1, \\ m_{12} = \varphi_1 / n_1, \\ m_{21} = n_1 \varphi_1 \left[1 - (k_1 / n_1)^2 + 2i(k_1 / n_1) \right]. \end{cases} \quad (3.31)$$

Здесь, для определения значений элементов матрицы интерференции, члены второго порядка малости по величине φ_1 были опущены ввиду их малого значения.

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

$$\begin{cases} r = \frac{n_1(n_0 - n_m - 2k_1\varphi_1) + (n_0n_m - n_1^2 + k_1^2)\varphi_1}{n_1(n_0 + n_m + 2k_1\varphi_1) + (n_0n_m + n_1^2 - k_1^2)\varphi_1}, \\ r' = \frac{n_1(n_m - n_0 - 2k_1\varphi_1) + (n_0n_m - n_1^2 + k_1^2)\varphi_1}{n_1(n_m + n_0 + 2k_1\varphi_1) + (n_0n_m + n_1^2 - k_1^2)\varphi_1}. \end{cases} \quad (3.32)$$

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

$$\begin{cases} \varphi_1 = 2\pi n_1 d_1 \lambda^{-1} = n_m - n_0, \\ n_0 n_m = n_1^2 - k_1^2. \end{cases} \quad (3.33)$$

Двухслойные интерференционные оптические системы

Перейдём к рассмотрению двухслойных диэлектрических систем. Это достаточно широкий класс покрытий, тем более, что существует теорема,

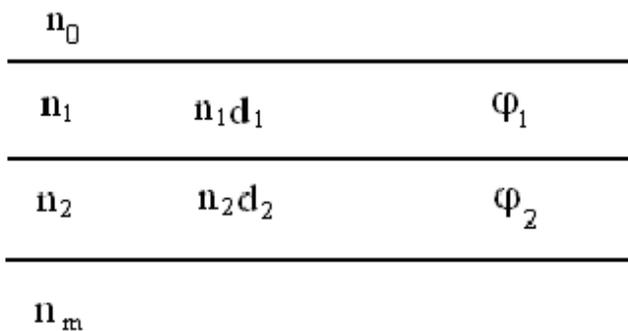


Рис. 3.11 Структурная схема двухслойной диэлектрической системы.

которая показывает, что любая многослойная система может быть сведена к двухслойной системе, характеризуемой эффективными показателями преломления и эффективными фазовыми толщинами.

Рассмотрим двухслойную систему, изображённую на рис.3.11. Полубесконечная среда, из которой по нормали падает излучение на рассматриваемые слои, характеризуется показателем

преломления n_0 . Первый слой, в котором распространяется излучение, имеет показатель преломления n_1 , геометрическую толщину d_1 и фазовую толщину φ_1 . Вторым слоем соответственно n_2 , d_2 и φ_2 , среда, в которую попадает излучение, имеет показатель преломления n_m . Фазовые толщины слоёв определяются, так же как и раньше:

$$\varphi_1 = 2\pi n_1 d_1 \lambda^{-1} \quad \text{и} \quad \varphi_2 = 2\pi n_2 d_2 \lambda^{-1}. \quad (3.34)$$

Волновой фронт падающего излучения плоский. Показатели преломления материалов, из которых формируются эти слои, не зависят преломления от толщины и толщины слоёв постоянны вдоль всей границы раздела. Прежде чем переходить к дальнейшему рассмотрению, следует обратить внимание на следующее обстоятельство. Существующие ГОСТы на оптические покрытия и отраслевые стандарты определяют порядок чередования слоёв, начиная от поверхности, на которой формируется покрытие. Это объясняется технологией формирования слоёв. Первый слой, формируемый на поверхности оптического элемента, носит первый номер. Если это многослойная система, то отсчёт всегда идёт от подложки. Используя матричное описание, пользуется обратный отсчёт. Это связано с тем, что многослойная интерференционная система описывается с помощью матрицы интерференции. Матрица интерференции системы слоёв есть матрица, равная произведению матриц интерференции каждого слоя.

$$M = \prod_{i=1}^j M_i. \quad (3.35)$$

Если переставить порядок слоёв или матриц их характеризующих, то будет получен другой результат, поскольку матрицы не коммутативны. Это часто приводит к путанице. Когда выбирается покрытие из стандарта и рассчитывается по данной методике, то, при несоблюдении указанного выше порядка чередования слоёв, получаются совершенно другие результаты.

Матрица интерференции двухслойной системы есть произведение матриц двух слоёв:

$$M = \begin{bmatrix} \cos \varphi_1 & i n_1^{-1} \sin \varphi_1 \\ i n_1 \sin \varphi_1 & \cos \varphi_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \varphi_2 & i n_2^{-1} \sin \varphi_2 \\ i n_2 \sin \varphi_2 & \cos \varphi_2 \end{bmatrix}. \quad (3.36)$$

В общем случае оптические толщины слоёв не равны между собой и имеют различные показатели преломления. Элементы результирующей матрицы интерференции имеют следующий вид:

$$\begin{cases} m_{11} = \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 - n_2 n_1^{-1} \sin \varphi_1 \sin \varphi_2, \\ m_{12} = n_1^{-1} \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 + n_2^{-1} \sin \varphi_2 \cos \varphi_1, \\ m_{21} = n_1 \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 + n_2 \sin \varphi_2 \cos \varphi_1, \\ m_{22} = \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 - n_1 n_2^{-1} \sin \varphi_1 \sin \varphi_2. \end{cases} \quad (3.37)$$

Диагональные матричные элементы, как и элементы матриц, характеризующих каждый слой, – это безразмерные элементы относительно показателя преломления, относительно фазовой толщины они все имеют размерность. Первый элемент второго столбца имеет размерность обратную показателю преломления, второй элемент первого столбца имеет размерность пропорциональную показателю преломления. Таким образом, у элемента матрицы интерференции m_{12} члены обратно пропорциональные показателю преломления, а у элемента матрицы интерференции m_{21} – пропорциональные показателю преломления. Диагональные элементы безразмерны относительно показателя преломления. Кроме того, следует обратить внимание, на элементы m_{11} , m_{22} , которые в матрице интерференции, характеризующей один слой, были одинаковы, здесь же они различаются. Детерминант матрицы равен единице, как и для одного слоя.

Определим величину амплитудного коэффициента отражения двухслойной системы, а дальше проведём исследование его свойств и характера изменения. Амплитудный коэффициент отражения такой системы:

$$r = \frac{(n_0 m_{11} - n_m m_{22}) - i(n_0 n_m m_{12} - m_{21})}{(n_0 m_{11} + n_m m_{22}) + i(n_0 n_m m_{12} + n_1 m_{21})}. \quad (3.38)$$

С учётом ранее полученных значений элементов матрицы можно записать выражения для коэффициента отражения в следующем виде:

$$r = \frac{a_1 + ib_1}{a_2 + ib_2}, \quad \text{где:}$$

$$\left. \begin{array}{l} a_1 \\ a_2 \end{array} \right\} = (n_0 \mp n_m) \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 + (n_0 n_2 n_1^{-1} \mp n_m n_1 n_2^{-1}) \sin \varphi_1 \sin \varphi_2, \quad (3.39)$$

$$\left. \begin{array}{l} b_1 \\ b_2 \end{array} \right\} = (n_0 n_m n_1^{-1} \mp n_1) \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 + (n_0 n_m n_2^{-1} \mp n_2) \sin \varphi_2 \cos \varphi_1.$$

Полученное выражение для амплитудного коэффициента отражения неудобно для анализа. Энергетический коэффициент отражения может быть легко определён на основе выражения (3.39). Энергетический коэффициент отражения есть квадрат модуля амплитудного коэффициента отражения или это сумма квадратов действительной и мнимой части числителя и знаменателя.

$$R = \frac{a_1^2 + b_1^2}{a_2^2 + b_2^2}. \quad (3.40)$$

Если рассмотреть зависимость энергетического коэффициента отражения от фазовой толщины слоёв, то видно, что если фазовые толщины слоёв, формирующих это покрытие, не кратны друг другу, т.е. величина φ_1 не кратна величине φ_2 , то станет очевидным, что это не периодическая функция. Зависимость энергетического коэффициента отражения от фазовой толщины слоёв будет периодической функцией, если величины φ_1 и φ_2 будут кратны друг другу, в этом случае может быть легко определён период этой функции. Период этой функции не всегда будет равен π , как это было в случае одного слоя. Период этой функции будет зависеть от соотношения фазовых толщин слоёв φ_1 и φ_2 . При анализе этой функции видно, что она, как и в случае одного слоя, имеет и максимальное, и минимальное значения энергетического коэффициента отражения. Эта система, так же как и однослойная, может увеличивать и уменьшать энергетический коэффициент отражения границы двух сред, на которой формируется.

Используя матричные элементы, можно написать выражение для пропускания. Здесь рассматриваются непоглощающие системы, поэтому расположение экстремумов энергетических коэффициентов отражения в шкале длин волн и пропускания совпадает, если рассматривать зависимости этих величин от фазовой толщины слоя. Такая зависимость позволяет утверждать, что эти экстремумы будут находиться на одних длинах волн. Существенный интерес представляет зависимость энергетического отражения от оптических толщин слоёв, их показателей преломления, а так же особенности спектральных характеристики двухслойных покрытий. Проведение такого анализа трудоёмкий процесс и поэтому он здесь не приводится.

Если рассматривать оптическую поверхность, полученную классическим методом (притиром), то следует помнить, что на ней расположены два слоя: трещиноватый и рельефный, показатели которых не равны между собой, и каждый из них отличается от показателя преломления материала, из которого формируется деталь. Толщина слоя, граничащего с

воздухом, меньше рабочей длины волны для полированной поверхности, толщина трещиноватого слоя может быть равна рабочей длин волны или меньше неё. Показатели преломления этих слоёв меньше, чем у материала, из которого изготовлен оптический элемент. Можно считать, что поскольку рельефный слой более насыщен воздухом, чем трещиноватый, его показатель преломления будет меньше, чем у стекла меньше, чем у трещиноватого. Рассмотрим некую модель поверхности слоя оптической поверхности, полученной классическим методом обработки поверхности (3.12).

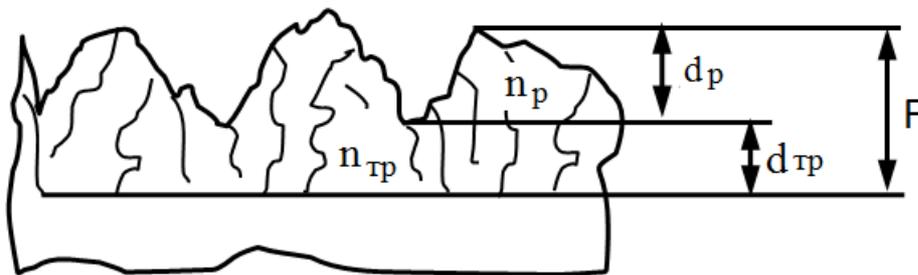


Рис.3.12. Строение оптической поверхности, полученной методом механической обработки, с параметрами полученных на её поверхности слоёв.

На рис.3.13 представлены спектральные характеристики энергетического коэффициента отражения для нескольких возможных вариантов структуры нарушенного слоя.

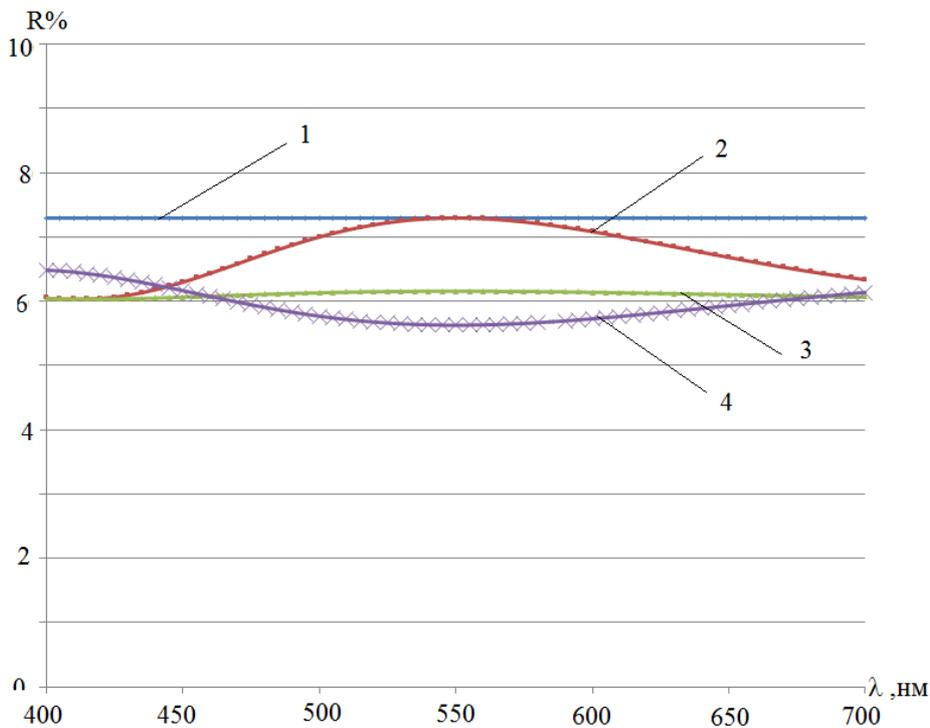


Рис.3.13 Влияние структуры нарушенного слоя на спектральную характеристику коэффициента отражения 1- чистое стекло (нарушенный слой отсутствует)($n_m=1.74$), 2- на стекле ($n_m=1.74$) сформированы два слоя ($n_1=1.68$, $n_1d_1=0.25\lambda_0$, $n_2=1.72$, $n_2d_2=0.5\lambda_0$), 3- на стекле ($n_m=1.74$) сформированы два слоя ($n_1=1.68$, $n_1d_1=0.25\lambda_0$, $n_2=1.72$, $n_2d_2=0.25\lambda_0$), 4- на стекле ($n_m=1.74$) сформированы два слоя ($n_1=1.68$, $n_1d_1=0.25\lambda_0$, $n_2=1.72$, $n_2d_2=0.5\lambda_0$), $\lambda_0=550$ нм.

Как видно из этих рисунков, наличие нарушенного слоя на оптической поверхности ведёт к уменьшению коэффициента отражения от этой поверхности. К сожалению, как толщину, так и показатель преломления нарушенного слоя практически невозможно контролировать. Только современные лазерные технологии позволяют создать на поверхности элементов фотоники так называемые пористые слои, у которых толщина и показатель преломления предсказуемы, но эти технологии в настоящее время не нашли широкого распространения.

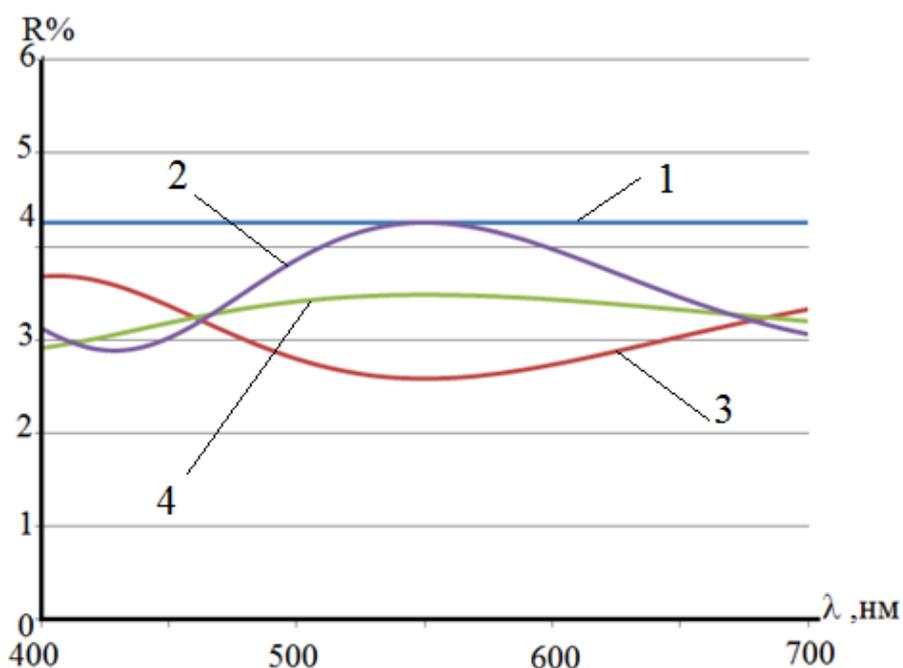


Рис.3.14 Влияние структуры нарушенного слоя на спектральную характеристику коэффициента отражения 1- чистое стекло (нарушенный слой отсутствует) ($n_m=1.52$), 2- на стекле ($n_m=1.52$) сформированы два слоя ($n_1=1.45$, $n_1d_1=0.5\lambda_0$, $n_2=1.48$, $n_2d_2=0.5\lambda_0$), 3- на стекле ($n_m=1.52$) сформированы два слоя ($n_1=1.45$, $n_1d_1=0.5\lambda_0$, $n_2=1.48$, $n_2d_2=0.25\lambda_0$), 4- на стекле ($n_m=1.52$) сформированы два слоя ($n_1=1.45$, $n_1d_1=0.25\lambda_0$, $n_2=1.48$, $n_2d_2=0.5\lambda_0$), $\lambda_0=550$ нм.

Литература

1. ГОСТ 2.412-81. Единая система конструкторской документации. Правила выполнения чертежей и схем оптических изделий ГОСТ 2.412-81. Единая система конструкторской документации. Правила выполнения чертежей и схем оптических изделий.
2. ГОСТ 3514-94. Стекло оптическое бесцветное.
3. ГОСТ 23136-93 Оптические материалы
4. Справочник технолога-оптика / М.А. Окатов. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб: Политехника, 2004. – 679 с
5. Ландсберг, Г.С. Оптика. Учеб. пособие: для вузов / Г.С Ландсберг. 6-е изд., стереот. – М.: Физматлит, 2003. – 848 с.
6. Л.В.Вишневская, А.В.Михайлов Ионная обработка оптически материалов в ГОИ им. С.И.Вавилова // Оптический журнал. 2019. Т.82. №3. С.50-54.
7. Оптические покрытия: Учебник / Э.С. Путилин, Л.А.Губанова. – СПб: Издательство «Лань», 2016. – 268 с.

Губанова Людмила Александровна

Фотоника поверхности и её основные свойства

Учебно-методическое пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, литер А