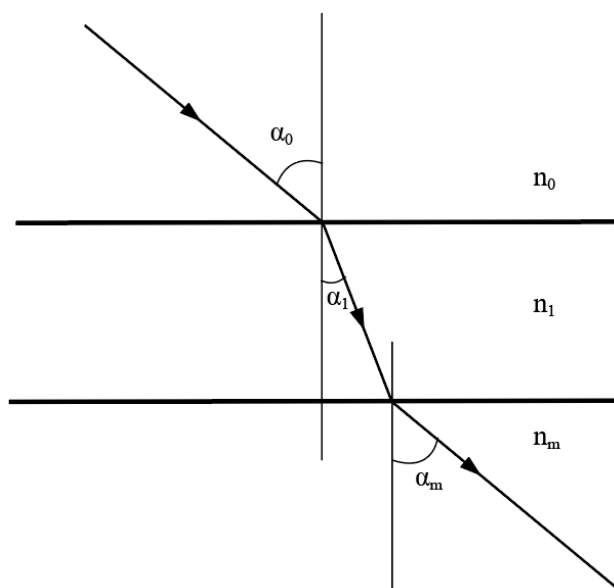


**Л.А. Губанова**

**ФОТОНИКА ПОВЕРХНОСТИ**



**Санкт-Петербург**

**2020**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**Л.А. Губанова**

## **ФОТОНИКА ПОВЕРХНОСТИ**

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО по направлению подготовки 12.04.02 «Оптотехника», 12.04.03 «Фотоника и оптоинформатика», 16.04.01 «Техническая физика» в качестве учебно–методического пособия для реализации основных профессиональных образовательных программ высшего образования магистратуры

**Учебно-методическое пособие**



**Санкт-Петербург**

**2020**

УДК 621.384.3

**Губанова Л.А.** Фотоника поверхности. Учебно-методическое пособие. – СПб: Университет ИТМО, 2020. – 85 с.

**Рецензент:** Новикова Юлиана Александровна, к.ф.-м.н., Доцент ГУАП

Методическое пособие к проведению практических занятий по курсу «Фотоника поверхности» и «Современные технологии формообразования» содержит сведения о физических явлениях, реализуемых на границе двух сред с разными показателями преломления, а также о изменении этих явлений в случае, когда на этой границе находится интерференционный слой, известной толщины, изготовленный из материала с известным показателем преломления.

В пособие рассмотрены вопросы, связанные с изменением характеристик отражённого и прошедшего излучения на границы двух сред с разными показателями преломления в зависимости от угла падения излучения и соотношения этих показателей преломления, также рассмотрено влияние на эти параметры наличия поглощения в одной из сред. Помимо этого, показано, как будут изменяться характеристики отражённого и прошедшего излучений при наличии на этой границе слоя, толщина которого меньше рабочей длины волны.

Рассмотренная в пособии информация может служить базой для решения задач, направленных на расчёт энергетических и спектральных характеристик границы раздела двух сред с разными показателями преломления, степени поляризации отражённого излучения.

В пособии приводится информация о влиянии интерференционного слоя, расположенного на границе, раздела двух сред, на энергетические и спектральные характеристики этой границы. Здесь же приводятся примеры решения задач, связанных с расчётом этих характеристик. Примеры решения задач, представленные в данном пособии, должны помочь обучающимся в освоении ряда дисциплин, связанных с процессами, происходящими на границе, раздела двух сред.

Пособие может быть полезно при изучении курсов «Технология формообразования», «Микро и макрооптика», «Современные способы формообразования», «Оптическая технология»

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



**Университет ИТМО** – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2020  
© Л.А. Губанова 2020

## Оглавление

<b>Введение</b>	<b>5</b>
<b>1 Физические процессы, происходящие на границе двух сред, которые имеют разные значения показателей преломления</b>	<b>8</b>
1.1 Граница раздела двух сред, имеющих разные показатели преломления	9
1.1.1 <i>Определение распределения амплитудного и энергетического коэффициентов отражения для s- и p- компонент отражённого излучения от угла его падения, для фиксированной длины волны</i>	9
1.1.2 <i>Определение степени поляризации отражённого излучения в зависимости от угла падения, ход лучей представлен на рис. 1.6</i>	13
1.1.3 <i>Определение распределения по углам амплитудного и энергетического коэффициентов отражения для s- и p- компонент излучения. Излучение падает из среды с большим показателем преломления. Поглощение в средах отсутствует (рис. 1.6)</i>	15
1.1.4 <i>Определение разности фаз между падающей и отражённой волнами для света, поляризованного в плоскости и перпендикулярно плоскости падения для фиксированной длины волны</i>	18
1.1.5 <i>Определение для известной длины волны распределения по углам энергетического коэффициентов отражения для s- и p- компонент в случае, когда в одной из граничащих сред присутствует поглощение</i>	20
1.1.6 <i>Определение спектральной характеристики коэффициента отражения, который возникает на границе раздела двух сред с различными значениями показателя преломления, в одной из сред присутствует поглощение</i>	23
<b>2 Интерференционный слой, расположенный на границе раздела двух сред, показатели преломления которых не равны</b>	<b>27</b>
2.1 Нормальное падение света на прозрачный изотропный слой	28
2.2 Однослойные покрытия при наклонном падении излучения	32
2.3 Оптические характеристики поглощающего слоя	37
2.4 <i>Определение спектральных характеристик энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Схема распространения излучения представлена на рис. 2.9</i>	45
2.5 <i>Определение зависимости энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение (рис. 2.9)</i>	49
2.6 <i>Определение спектральных характеристик энергетического коэффициента отражения s- и p- компонент для случая, когда на поверхности оптического элемента присутствует слой из материала, у которого отсутствует поглощение, Схема распространения излучения представлена на рис. 2.9</i>	53
2.7 <i>Определение распределения фазы отражённого излучения по длинам волн для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Схема распространения излучения представлена на рис. 2.9</i>	57
2.8 <i>Определение распределения фазы отражённого излучения в зависимости от угла падения излучения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Схема распространения излучения представлена на рис. 2.9</i>	61
2.9 <i>Определение спектральных характеристик энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого присутствует поглощение. Показатель преломления такого слоя имеет вид <math>(n-ik)</math>. Схема хода лучей представлена на</i>	

	рис. 2.15	65
2.10	Определение спектральных характеристик энергетического коэффициента отражения s- и p- компонент для случая, когда на поверхности оптического элемента присутствует слой из материала, у которого присутствует поглощение. Излучение падает в заданном диапазоне углов на известной длине волны. Схема хода лучей представлена на рис. 2.9	70
2.11	Определение спектральных характеристик энергетического коэффициента отражения и пропускания для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого присутствует поглощение, значение которого много меньше 1. Показатель преломления такого слоя имеет вид $(n-ik)$ . Схема хода лучей представлена на рис. 2.9	75
2.12	Определение спектральных характеристик энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента, изготовленного из материала, у которого присутствует поглощением, нанесён слой из непоглощающего материала (схема хода лучей показана на рис. 2.19)	79
<b>Литература</b>		<b>85</b>

## Введение

Использование оптических систем в различных оптико-электронных приборах и системах, предназначенных для передачи данных и распознавании различных объектов, основано на использовании различных источников излучения, которые характеризуются мощностью и рабочим спектральным диапазоном. Возрастающие требования к чёткости передаваемого излучения и распознаваемости получаемых изображений ведёт к усложнению оптических систем, увеличению количества оптических элементов, входящих в их состав. Каждый из оптических элементов имеет две границы, которые разделяют среду, из которой падает излучение, и среду, в которой оно распространяется. Чаще всего это границы воздух - оптический материал и оптический материала - воздух. Оптический материал может иметь в своём составе поглощающие элементы, что также сказывается на процессах, происходящих на этих границах. Рассмотрению явлений, наблюдаемых на границе двух сред, показатели преломления которых различны, посвящено данное методическое пособие.

При анализе явлений, наблюдаемых на границе двух сред с разными показателями преломления, следует учитывать, что падающее на эту границу световое излучение претерпевает не только преломление, но и отражение. При этом на рассматриваемой границе наблюдается изменение фазы как отражённого, так и прошедшего излучения, что может изменить форму прошедшего (отражённого) светового фронта.

Величина коэффициента отражения зависит от разности показателей преломления граничащих сред, а также от угла падения излучения на эту границу. В случае, если материалы характеризуются показателями преломления с малой дисперсией, коэффициент отражения постоянен на некотором участке спектра, но при рассмотрении поглощающих материалов следует помнить, что и показатель преломления, и коэффициент дисперсии таких материалов имеют высокую зависимость от длины волны, поэтому спектральные характеристики коэффициента отражения у каждого поглощающего материал будут иметь свою форму.

Существенным фактором при рассмотрении отражения от границы раздела двух сред является угол падения излучения на эту границу. Этот угол измеряется между нормалью к поверхности и распространением светового потока. Можно рассмотреть три причины возникновения этого угла. Первая – излучение падает на поверхность под некоторым углом. Вторая – падающий поток не параллельный, а имеет некоторую расходямость, и в случае нормального падения излучения часть излучения падает под некоторым углом. Третье - при падении параллельного пучка на оптический элемент, форма которого отличается от плоскости, все лучи будут падать на оптический элемент под разными углами, определяемыми формой поверхности. При падении неполяризованного излучения под углом при отражении оно распадается на две компоненты  $s$  и  $p$ , причём распределение энергетического коэффициента

отражения для каждой компоненты будет иметь свой характер. Этот характер будет определяться соотношением показателей преломления граничащих сред.

При анализе границы оптический материал – воздух необходимо помнить, что в процессе формообразования на поверхности оптического элемента образуется нарушенный слой, который состоит из двух частей: рельефного, определяющего шероховатость поверхности, и трещиноватого, возникающего в результате напряжений в стекле, которые являются результатом действия абразива или инструмента, используемых при обработке поверхности. Этот слой имеет показатель преломления, отличный от показателя преломления оптического материала, что приводит к образованию дополнительной границы на поверхности оптического элемента, т.е. наблюдаются две границы: граница воздух - переходный слой и переходный слой- оптический материал. Существует ещё одна причина образования переходного слоя на поверхности оптического компонента - это химические реакции, приводящие к нарушению химического состава поверхностного слоя и, следовательно, к изменению показателя преломления, что тоже приводит к образованию второй границы раздела. Помимо этого, на поверхности оптического элемента может формироваться некий слой, предназначенный для изменения физико-химических свойств исследуемой поверхности, для защиты его от воздействия атмосферы, упрочнения, изменения спектральных характеристик.

В случае, если расстояние между границами соизмеримо с рабочей длиной волны, то при отражении лучи могут интерферировать между собой, в результате чего отражённое излучение может или увеличиваться, или уменьшаться, и, соответственно, прошедшее будет в первом случае уменьшаться, а во втором увеличиваться.

Зависимость толщины слоя от координаты поверхности оптического элемента, на котором он формируется, и распределение показателя преломления по толщине слоя будут определять зависимости спектральных кривых от координаты на поверхности подложки.

Задача определения влияния параметров слоя (показателя преломления, коэффициента поглощения материала, из которого он сформирован, а также его геометрическая толщина) на спектральные характеристики поверхности является актуальной. Ограничение на толщину таких слоёв связано с определением условий, когда слой перестаёт влиять на энергетические характеристики (минимальное значение) оптической поверхности и величиной напряжения в слоях, которое может привести к их разрушению (максимальная толщина). Здесь также весьма существенной является зависимость спектральных характеристик от угла падения излучения.

При рассмотрении слоёв, сформированных на сферических (асферическая поверхность), следует помнить, что при падении излучения на такие поверхности углы падения в каждой точке различны, что может привести к возникновению «окрашенных» зон на оптической поверхности. Определение того, насколько существенно влияние таких зон на цветопередачу транслируемого изображения весьма важно при создании устройств,

передающих цветное изображение, особенно если эти оптические объекты используются в устройствах для измерения температуры.

Формирование слоёв из поглощающих материалов существенно изменяет спектральные характеристики оптической поверхности в широком спектральном диапазоне из-за наличия дисперсии показателя преломления и коэффициента поглощения, при этом снижая термическую стойкость поверхности детали. Здесь также следует помнить, что при формировании слоя из непоглощающего материала на спектральные характеристик не влияет направление распространения излучения (первая среда - слой – вторая среда или вторая среда – слой – первая среда), в случае, когда слой изготовлен из поглощающего материала, направление излучение будет оказывать влияние на величину отражённого излучения.

При рассмотрении покрытий на границе раздела двух сред, величины показателей преломления которых различны, следует учитывать, что фаза отражённого и прошедшего излучений будет меняться не только при изменении угла падения излучения, но и по спектру, что оказывает значительное влияние на формирование отражённого (прошедшего) волновых фронтов.

Достаточно интересен анализ влияния непоглощающего слоя, сформированного на поглощающем материале. Такой слой часто выполняет защитную функцию, при этом стоит помнить, что он изменяет и спектральные характеристики поверхности.

Данное учебное пособие посвящено расчётам энергических и фазовых характеристик поверхности оптического элемента, определению факторов, оказывающих наибольшее влияние на распределение этих характеристик в зависимости от угла падения излучения и от длины волны. Рассмотрение влияния параметров слоя, находящегося на поверхности оптического элемента, на его передающие способности, цветопередачу позволит расширить знания и навыки при конструировании оптико-электронных приборов, используемых в разных областях приборостроения.



# 1 ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ НА ГРАНИЦЕ ДВУХ СРЕД, КОТОРЫЕ ИМЕЮТ РАЗНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Рассмотрим границу двух сред, одним из отличий которых является неравенство показателей преломления, величины которых известны. Будем считать, что среды однородные и изотропные, а граница плоская. На такой границе будет наблюдаться несколько физических явлений: отражение падающего светового потока, изменение энергии прошедшего потока, рассеяние излучения, возможно, изменение формы прошедшего (отражённого) волнового фронта, связанное со скачком фаз на этой границе.

Порядок определения распространения электромагнитного излучения, падающего на рассматриваемую границу раздела, детально рассмотрен в [1].

Величина амплитудного коэффициента отражения для  $p$ - и  $s$ -компонент отраженного излучения, как это следует из материалов, представленных в [1] равна

$$r_p = \frac{n_2^2 \cos^2 \alpha_0 + in_1 \sqrt{n_1^2 \sin^2 \alpha_0 - n_2^2}}{n_2^2 \cos^2 \alpha_0 - in_1 \sqrt{n_1^2 \sin^2 \alpha_0 - n_2^2}} = e^{ip_p}, \quad (1.1)$$

$$r_s = \frac{n_1^2 \cos \alpha_0 + i \sqrt{n_1^2 \sin^2 \alpha_0 - n_2^2}}{n_1^2 \cos \alpha_0 - i \sqrt{n_1^2 \sin^2 \alpha_0 - n_2^2}} = e^{ip_s}$$

или

$$\rho_p = 2 \arg \operatorname{tg} \left[ \left( n_1 \left[ (n_1^2) \sin^2 \alpha_0 - 1 \right]^{0.5} \right) (n_1 \cos \alpha_0)^{-1} \right], \quad (1.2)$$

$$\rho_s = 2 \arg \operatorname{tg} \left[ \left( \left[ (n_1^2) \sin^2 \alpha_0 - 1 \right]^{0.5} \right) (n_1 \cos \alpha_0)^{-1} \right].$$

Графические зависимости  $\rho_p$  и  $\rho_s$  от угла падения излучения приведены на рис.1.1.

При рассмотрении границы излучения двух сред, одна из которых имеет известное поглощение ( $k_m$ ) и характеризуется комплексным показателем преломления,  $\tilde{n}_m = n_m - ik_m$ , вторая, из которой падает излучение, не имеет поглощения, характеризуется показателем преломления  $n_0$ , амплитудный коэффициент отражения может быть определён из соотношения

$$r = \frac{n_0 - \tilde{n}_m}{n_0 + \tilde{n}_m} = \frac{n_0 - n_m + ik_m}{n_0 + n_m - ik_m}, \quad (1.3)$$

Величину энергетического коэффициента отражения, соответственно, можно определить, воспользуясь выражением:

$$R = \left| \frac{n_0 - n_m + ik_m}{n_0 + n_m - ik_m} \right|^2. \quad (1.4)$$

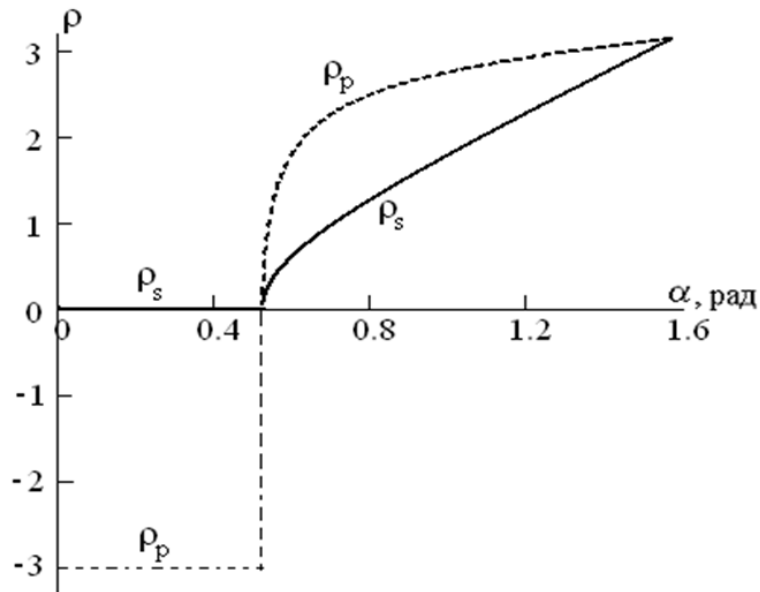


Рисунок 1.1 — Зависимость разности фаз между падающей и отражённой волнами для излучения, поляризованного в плоскости и перпендикулярно плоскости падения при отражении от границы раздела двух сред,  $n_0 > n_m$ ,  $n_0 = 2$ ,  $n_m = 1$  от угла падения света

Следует помнить, что поглощающие среды в большинстве случаев имеют значительную дисперсию показателя преломления, поэтому расчёт коэффициента отражения от такой границы следует проводить с учётом изменения параметров материала по длинам волн, т.е.

$$R(\lambda) = \left| \frac{n_0 - n_m(\lambda) + ik_m(\lambda)}{n_0 + n_m(\lambda) - ik_m(\lambda)} \right|^2. \quad (1.5)$$

## 1.1 Граница раздела двух сред, имеющих разные показатели преломления

### 1.1.1 Определение распределения амплитудного и энергетического коэффициентов отражения для $s$ - и $p$ - компонент отражённого излучения от угла его падения, для фиксированной длины волны

Излучение падает из среды с меньшим показателем преломления. Поглощение в средах отсутствует.

**Задача 1.1.** Необходимо определить распределение по углам амплитудного и энергетического коэффициентов отражения для  $s$ - и  $p$ -компонент для излучения, падающего на границу раздела двух сред с разными показателями преломления в заданном диапазоне углов ( $\alpha_0$ ), для фиксированной длины волны (рис. 1.2).

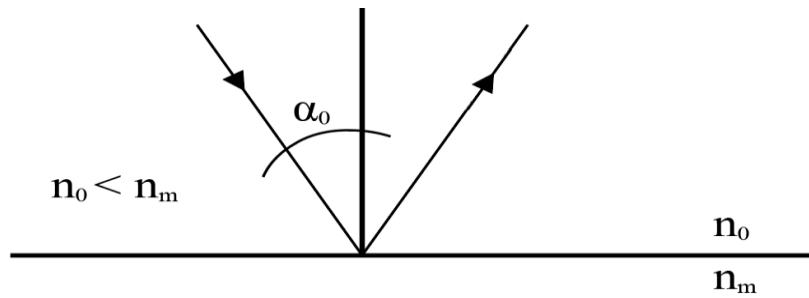


Рисунок 1.2 — Иллюстрация к задаче 1.1

**Вариант 1.1.** Излучение падает из среды, характеризуемой показателем преломления ( $n_0$ ), равным 1.0, на среду с показателем преломления ( $n_m$ ), равным 1.40. Диапазон падения углов  $0^0 < \alpha_0 < 90^0$ .

**Вариант 1.2.** Излучение падает из среды, характеризуемой показателем преломления ( $n_0$ ), равным 1.0 на среду с показателем преломления ( $n_m$ ), равным 1.50. Диапазон падения углов  $0^0 < \alpha_0 < 90^0$ .

**Вариант 1.3.** Излучение падает из среды, характеризуемой показателем преломления ( $n_0$ ), равным 1.0, на среду с показателем преломления ( $n_m$ ), равным 1.60. Диапазон падения углов  $0^0 < \alpha_0 < 90^0$ .

**Вариант 1.4.** Излучение падает из среды, характеризуемой показателем преломления ( $n_0$ ), равным 1.0, на среду с показателем преломления ( $n_m$ ), равным 1.70. Диапазон падения углов  $0^0 < \alpha_0 < 90^0$ .

**Вариант 1.5.** Излучение падает из среды, характеризуемой показателем преломления ( $n_0$ ), равным 1.30, на среду с показателем преломления ( $n_m$ ), равным 1.40. Диапазон падения углов  $0^0 < \alpha_0 < 90^0$ .

**Вариант 1.6.** Излучение падает из среды, характеризуемой показателем преломления ( $n_0$ ), равным 1.30, на среду с показателем преломления ( $n_m$ ), равным 1.50. Диапазон падения углов  $0^0 < \alpha_0 < 90^0$ .

**Вариант 1.7.** Излучение падает из среды, характеризуемой показателем преломления ( $n_0$ ), равным 1.30, на среду с показателем преломления ( $n_m$ ), равным 1.60. Диапазон падения углов  $0^0 < \alpha_0 < 90^0$ .

**Вариант 1.8.** Излучение падает из среды, характеризуемой показателем преломления ( $n_0$ ), равным 1.0, на среду с показателем преломления ( $n_m$ ), равным 1.70. Диапазон падения углов  $0^0 < \alpha_0 < 90^0$ .

**Вариант 1.9.** Излучение падает из среды, характеризуемой показателем преломления ( $n_0$ ), равным 1.45, и падает на среду с показателем преломления ( $n_m$ ), равным 1.50. Диапазон падения углов  $0^0 < \alpha_0 < 90^0$ .

**Вариант 1.10.** Излучение падает из среды, характеризуемой показателем преломления ( $n_0$ ), равным 1.45, на среду с показателем преломления ( $n_m$ ), равным 1.65. Диапазон падения углов  $0^0 < \alpha_0 < 90^0$ .

**Вариант 1.11.** Излучение падает из среды, характеризуемой показателем преломления ( $n_0$ ), равным 1.45, на среду с показателем преломления ( $n_m$ ), равным 1.75. Диапазон падения углов  $0^0 < \alpha_0 < 90^0$ .

**Вариант 1.12.** Излучение падает из среды, характеризуемой показателем преломления ( $n_0$ ), равным 1.45, на среду с показателем преломления ( $n_m$ ), равным 1.85. Диапазон падения углов  $0^0 < \alpha_0 < 90^0$ .

### Пример решения задачи данного вида

В условиях задачи заданы следующие величины:  $n_0=1.0$ ,  $n_m=2.0$  и диапазон падения углов излучения.

Решение задачи следует начать с определения показателей преломления сред для  $s$ - и  $p$ - компонент. Согласно выражениям, приведённым в [1],

$$n_0^s = n_0 \cos \alpha_0, n_m^s = n_m \cos \alpha_1, n_0^p = n_0^{-1} \cos \alpha_0, n_m^p = n_m^{-1} \cos \alpha_1,$$

где согласно закону Снеллиуса  $\alpha_1 = \arcsin(n_0 n_m^{-1} \sin \alpha_0)$ .

Тогда, воспользовавшись выражением, приведённым в [1], следует определить амплитудный коэффициент отражения для  $s$ - компоненты по формуле:

$$r^s = \frac{n_0^s - n_m^s}{n_0^s + n_m^s} = \frac{n_0 \cos \alpha_0 - n_m \cos \alpha_m}{n_0 \cos \alpha_0 + n_m \cos \alpha_{m0}}$$

и, соответственно, для  $p$ - компоненты

$$r^p = \frac{n_0^p - n_m^p}{n_0^p + n_m^p} = \frac{n_0^{-1} \cos \alpha_0 - n_m^{-1} \cos \alpha_m}{n_0^{-1} \cos \alpha_0 + n_m^{-1} \cos \alpha_{m0}}.$$

А для неполяризованного излучения

$$r = 0.5(r^p + r^s).$$

Для условий данного примера характер распределения амплитудных коэффициентов отражения в зависимости от угла падения для разных компонент и неполяризованного излучения будет иметь вид, представленный на рис. 1.3.

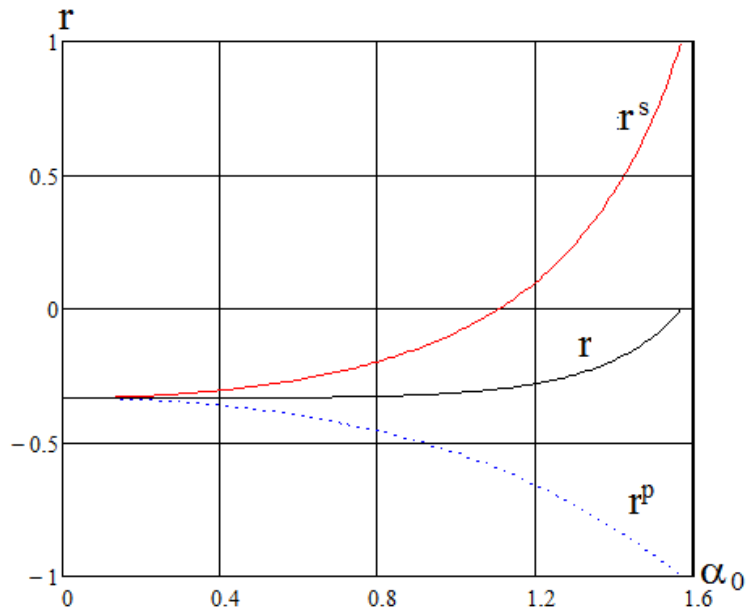


Рисунок 1.3 — Распределение амплитудного коэффициента отражения по углам падения излучения для  $s$ - и  $p$ - компонент, при условии, что  $n_0=1.0$ ,  $n_m=2.0$

Энергетический коэффициент отражения для разных компонент и неполяризованного излучения может быть определён из соотношения:

$$R^s = |r^s|^2, R^p = |r^p|^2 \text{ и } R = |r|^2$$

Для условий данного примера характер распределения энергетических коэффициентов отражения для разных компонент и неполяризованного излучения будет в зависимости от угла падения иметь вид, представленный на рис.1.4.

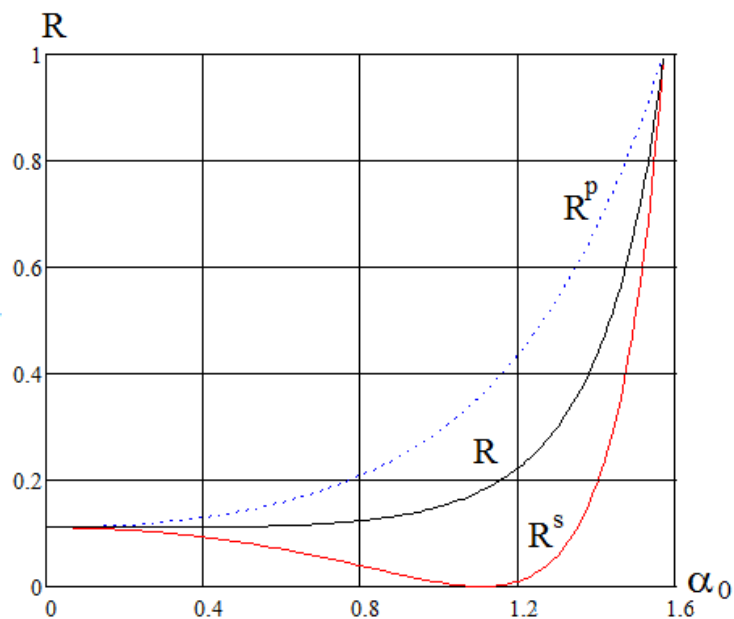


Рисунок 1.4 — Распределение энергетического коэффициента отражения по углам падения излучения для  $s$ - и  $p$ - компонент, при условии, что  $n_0=1.0$ ,  $n_m=2.0$

**1.1.2 Определение степени поляризации отражённого излучения в зависимости от угла падения, ход лучей представлен на рис. 1.6.**

**Задача 2.** Определить степень поляризации отражённого излучения в зависимости от угла падения для излучения, падающего в заданном диапазоне углов ( $\alpha_0$ ) на границу раздела двух сред с разными показателями преломления.

**Вариант 2.1.** Излучение падает из среды, характеризуемой показателем преломления ( $n_0$ ), равным 1.0, на среду с показателем преломления ( $n_m$ ), равным 1.40. Диапазон падения углов  $0^0 < \alpha_0 < 90^0$ .

**Вариант 2.2.** Излучение падает из среды, характеризуемой показателем преломления ( $n_0$ ), равным 1.0, на среду с показателем преломления ( $n_m$ ), равным 1.50. Диапазон падения углов  $0^0 < \alpha_0 < 90^0$ .

**Вариант 2.3.** Излучение падает из среды, характеризуемой показателем преломления ( $n_0$ ), равным 1.0 на среду с показателем преломления ( $n_m$ ), равным 1.60. Диапазон падения углов  $0^0 < \alpha_0 < 90^0$ .

**Вариант 2.4.** Излучение падает из среды, характеризуемой показателем преломления ( $n_0$ ), равным 1.0, на среду с показателем преломления ( $n_m$ ), равным 1.70. Диапазон падения углов  $0^0 < \alpha_0 < 90^0$ .

**Вариант 2.5.** Излучение падает из среды, характеризуемой показателем преломления ( $n_0$ ), равным 1.30 на среду, с показателем преломления ( $n_m$ ), равным 1.40. Диапазон падения углов  $0^0 < \alpha_0 < 90^0$ .

**Вариант 2.6.** Излучение падает из среды, характеризуемой показателем преломления ( $n_0$ ), равным 1.30, на среду с показателем преломления ( $n_m$ ), равным 1.50. Диапазон падения углов  $0^0 < \alpha_0 < 90^0$ .

**Вариант 2.7.** Излучение падает из среды, характеризуемой показателем преломления ( $n_0$ ), равным 1.30, на среду с показателем преломления ( $n_m$ ), равным 1.60. Диапазон падения углов  $0^0 < \alpha_0 < 90^0$ .

**Вариант 2.8.** Излучение падает из среды, характеризуемой показателем преломления ( $n_0$ ), равным 1.0 на среду с показателем преломления ( $n_m$ ), равным 1.70. Диапазон падения углов  $0^0 < \alpha_0 < 90^0$ .

**Вариант 2.9.** Излучение падает из среды, характеризуемой показателем преломления ( $n_0$ ), равным 1.45, и падает на среду с показателем преломления ( $n_m$ ), равным 1.50. Диапазон падения углов  $0^0 < \alpha_0 < 90^0$ .

**Вариант 2.10.** Излучение падает из среды, характеризуемой показателем преломления ( $n_0$ ), равным 1.45, на среду с показателем преломления ( $n_m$ ), равным 1.65. Диапазон падения углов  $0^0 < \alpha_0 < 90^0$ .

**Вариант 2.11.** Излучение падает из среды, характеризуемой показателем преломления ( $n_0$ ), равным 1.45, на среду с показателем преломления ( $n_m$ ), равным 1.75. Диапазон падения углов  $0^0 < \alpha_0 < 90^0$ .

**Вариант 2.12.** Излучение падает из среды, характеризуемой показателем преломления ( $n_0$ ), равным 1.45, на среду с показателем преломления ( $n_m$ ), равным 1.85. Диапазон падения углов  $0^0 < \alpha_0 < 90^0$ .

### Пример решения задачи данного вида

В условиях задачи заданы следующие величины:  $n_0=1.0$ ,  $n_m=2.0$  и диапазон падения углов излучения.

Решение задачи следует начать с определения показателей преломления сред для  $s$ - и  $p$ - компонент. Согласно выражениям, приведённым в [1],

$$n_0^s = n_0 \cos \alpha_0, n_m^s = n_m \cos \alpha_1, n_0^p = n_0^{-1} \cos \alpha_0, n_m^p = n_m^{-1} \cos \alpha_1,$$

где согласно закону Снеллиуса  $\alpha_1 = \arcsin(n_0 n_m^{-1} \sin \alpha_0)$ .

Тогда, воспользовавшись выражением, приведённым в [1], следует определить амплитудный коэффициент отражения для  $s$ - компоненты по формуле:

$$r^s = \frac{n_0^s - n_m^s}{n_0^s + n_m^s} = \frac{n_0 \cos \alpha_0 - n_m \cos \alpha_m}{n_0 \cos \alpha_0 + n_m \cos \alpha_m}$$

и, соответственно, для  $p$ - компоненты

$$r^p = \frac{n_0^p - n_m^p}{n_0^p + n_m^p} = \frac{n_0^{-1} \cos \alpha_0 - n_m^{-1} \cos \alpha_m}{n_0^{-1} \cos \alpha_0 + n_m^{-1} \cos \alpha_m}.$$

А для неполяризованного излучения

$$r = 0.5(r^p + r^s)$$

Степень поляризации отражённого излучения согласно выражению, приведённому в [1], может быть определена следующим образом:

$$P = \frac{|R_p - R_s|}{|R_p + R_s|}.$$

Для условий данного примера характер распределения степени поляризации отражённого излучения в зависимости от угла падения для разных компонент и неполяризованного излучения будет иметь вид, представленный на рис. 1.5.

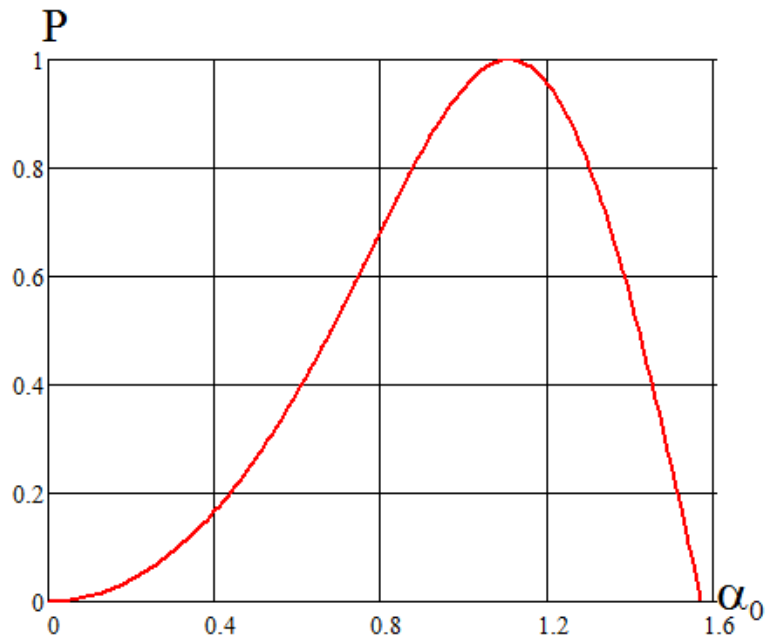


Рисунок 1.5 — Степень поляризации отражённого излучения в зависимости от угла падения, при условии, что  $n_0=1.0$ ,  $n_m=2.0$

**1.1.3 Определение распределения по углам амплитудного и энергетического коэффициентов отражения для  $s$ - и  $p$ - компонент излучения. Излучение падает из среды с большим показателем преломления. Поглощение в средах отсутствует (рис. 1.6)**

**Задача 3.** Необходимо определить для фиксированной длины волны распределение по углам амплитудного и энергетического коэффициентов отражения для  $s$ - и  $p$ - компонент излучения, падающего в заданном диапазоне углов ( $\alpha_0$ ) на границу раздела двух сред с разными показателями преломления.

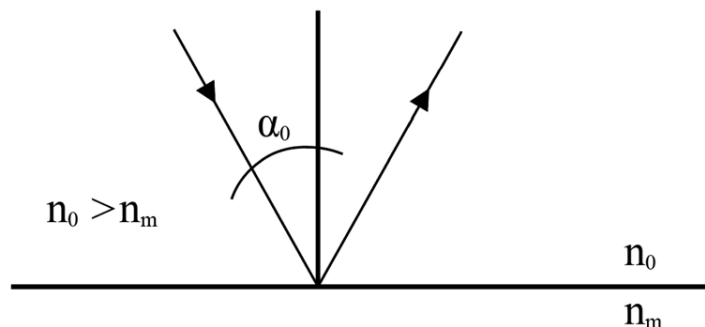


Рисунок 1.6 — Иллюстрация к задаче 3

**Вариант 3.1.** Излучение падает из среды, характеризуемой показателем преломления ( $n_0$ ), равным 1.40, на среду с показателем преломления ( $n_m$ ), равным 1.0. Диапазон падения углов  $0^0 < \alpha_0 < 90^0$ .





## Пример решения задачи данного вида

В условиях задачи заданы следующие величины:  $n_0=2.45$ ,  $n_m=1.0$  и диапазон падения излучения.

Решение задачи следует начать с определения показателей преломления сред для  $s$  и  $p$  компонент. Согласно выражениям, приведённым в [1],

$$n_0^s = n_0 \cos \alpha_0, n_m^s = n_m \cos \alpha_1, n_0^p = n_0^{-1} \cos \alpha_0, n_m^p = n_m^{-1} \cos \alpha_1,$$

где согласно закону Снеллиуса  $\alpha_1 = \arcsin(n_0 n_m^{-1} \sin \alpha_0)$ .

Тогда, воспользовавшись выражением, приведённым в [1], следует определить амплитудный коэффициент отражения для  $s$ - компоненты по формуле:

$$r^s = \frac{n_0^s - n_m^s}{n_0^s + n_m^s} = \frac{n_0 \cos \alpha_0 - n_m \cos \alpha_m}{n_0 \cos \alpha_0 + n_m \cos \alpha_m}$$

и, соответственно, для  $p$ - компоненты

$$r^p = \frac{n_0^p - n_m^p}{n_0^p + n_m^p} = \frac{n_0^{-1} \cos \alpha_0 - n_m^{-1} \cos \alpha_m}{n_0^{-1} \cos \alpha_0 + n_m^{-1} \cos \alpha_m}.$$

А для неполяризованного излучения

$$r = 0.5(r^p + r^s).$$

Для условий данного примера характер распределения амплитудных коэффициентов отражения в зависимости от угла падения для разных компонент и неполяризованного излучения представлен на рис. 1.7.

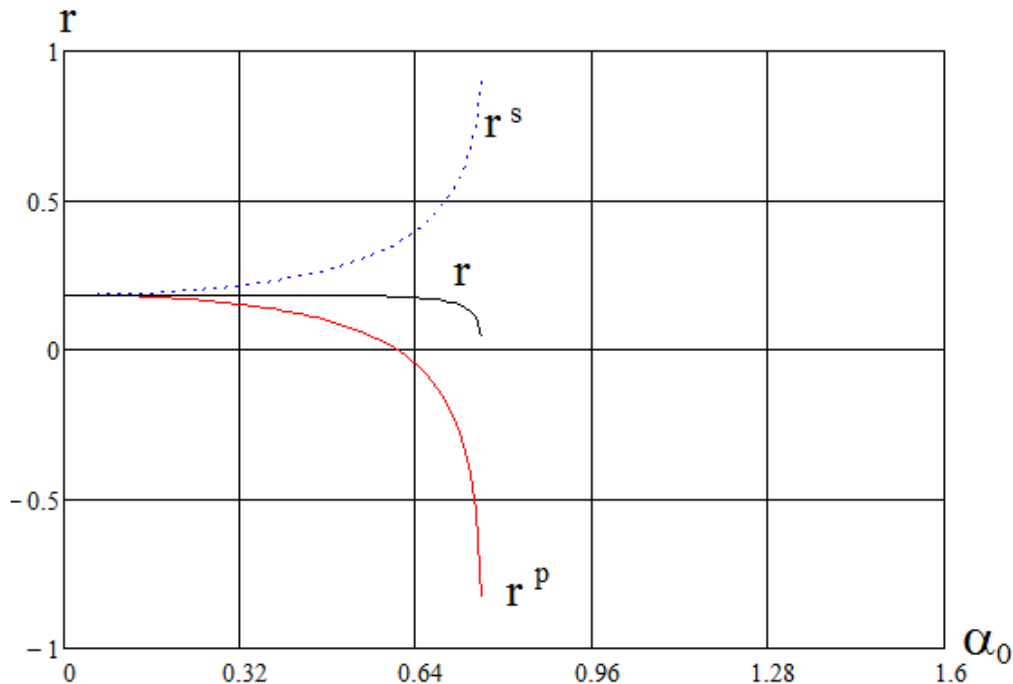


Рисунок 1.7 — Распределение амплитудного коэффициента отражения по углам падения излучения для  $s$ - и  $p$ - компонент, при условии, что  $n_0=2.45$ ,  $n_m=1.0$

Энергетический коэффициент отражения для разных компонент и неполяризованного излучения может быть определён из соотношения:

$$R^s = |r^s|^2, R^p = |r^p|^2 \text{ и } R = |r|^2.$$

Для условий данного примера характер распределения энергетических коэффициентов отражения в зависимости от угла падения для разных компонент и неполяризованного излучения представлен на рис. 1.8.

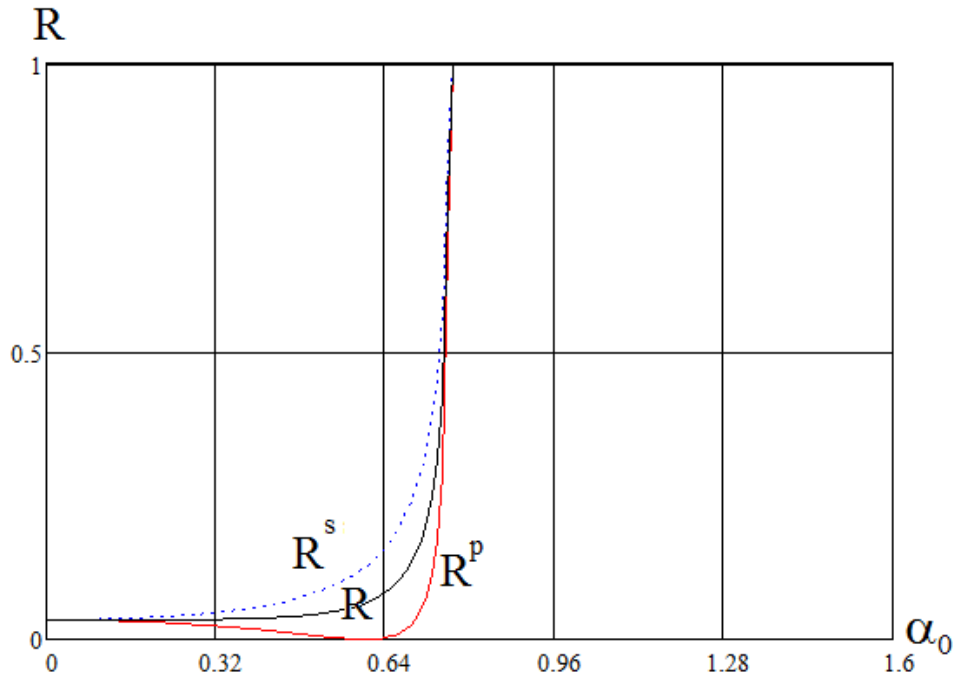


Рисунок 1.8 — Распределение энергетического коэффициента отражения по углам падения излучения для  $s$ - и  $p$ - компонент, при условии, что  $n_0=2.45$ ,  $n_m=1.0$

**1.1.4 Определение разности фаз между падающей и отражённой волнами для света, поляризованного в плоскости и перпендикулярно плоскости падения для фиксированной длины волны**

**Задача 4.** Определить зависимость разности фаз между падающей и отражённой волнами для света, поляризованного в плоскости и перпендикулярно плоскости падения при отражении от границы раздела двух сред,  $n_0 > n_m$ ,  $n_0=2.5$ ,  $n_m=1$ , от угла падения света

**Вариант 4.1.** Излучение падает из среды, характеризуемой показателем преломления ( $n_0$ ), равным 1.50, на среду с показателем преломления ( $n_m$ ), равным 1.0. Диапазон падения углов  $0^\circ < \alpha_0 < 90^\circ$ .

**Вариант 4.2.** Излучение падает из среды, характеризуемой показателем преломления ( $n_0$ ), равным 1.60, на среду с показателем преломления ( $n_m$ ), равным 1.0. Диапазон падения углов  $0^\circ < \alpha_0 < 90^\circ$ .

**Вариант 4.3.** Излучение падает из среды, характеризуемой показателем преломления ( $n_0$ ), равным 1.70, на среду с показателем преломления ( $n_m$ ), равным 1.0. Диапазон падения углов  $0^0 < \alpha_0 < 90^0$ .

**Вариант 4.4.** Излучение падает из среды, характеризуемой показателем преломления ( $n_0$ ), равным 1.40 на среду с показателем преломления ( $n_m$ ), равным 1.30. Диапазон падения углов  $0^0 < \alpha_0 < 90^0$ .

**Вариант 4.5.** Излучение падает из среды, характеризуемой показателем преломления ( $n_0$ ), равным 1.50, на среду с показателем преломления ( $n_m$ ), равным 1.30. Диапазон падения углов  $0^0 < \alpha_0 < 90^0$ .

**Вариант 4.6.** Излучение падает из среды, характеризуемой показателем преломления ( $n_0$ ), равным 1.60, на среду с показателем преломления ( $n_m$ ), равным 1.30. Диапазон падения углов  $0^0 < \alpha_0 < 90^0$ .

**Вариант 4.7.** Излучение падает из среды, характеризуемой показателем преломления ( $n_0$ ), равным 1.70, на среду с показателем преломления ( $n_m$ ), равным 1.30. Диапазон падения углов  $0^0 < \alpha_0 < 90^0$ .

**Вариант 4.8.** Излучение падает из среды, характеризуемой показателем преломления ( $n_0$ ), равным 1.50, на среду с показателем преломления ( $n_m$ ), равным 1.45. Диапазон падения углов  $0^0 < \alpha_0 < 90^0$ .

**Вариант 4.9.** Излучение падает из среды, характеризуемой показателем преломления ( $n_0$ ), равным 1.65, на среду с показателем преломления ( $n_m$ ), равным 1.45. Диапазон падения углов  $0^0 < \alpha_0 < 90^0$ .

**Вариант 4.10.** Излучение падает из среды, характеризуемой показателем преломления ( $n_0$ ), равным 1.75, на среду с показателем преломления ( $n_m$ ), равным 1.45. Диапазон падения углов  $0^0 < \alpha_0 < 90^0$ .

**Вариант 4.11.** Излучение падает из среды, характеризуемой показателем преломления ( $n_0$ ), равным 1.85, на среду с показателем преломления ( $n_m$ ), равным 1.45. Диапазон падения углов  $0^0 < \alpha_0 < 90^0$ .

### **Пример решения задачи данного вида**

В условиях задачи заданы следующие величины:  $n_0=1.0$ ,  $n_m=2.0$  и диапазон падения углов излучения.

Согласно формуле, приведённой в [1], фаза отражённой волны для  $p$ -компоненты может быть определена из выражения:

$$\rho_p = 2 \arg \operatorname{tg} \left[ \left( n_1 \left[ (n_1^2) \sin^2 \alpha_0 - 1 \right]^{0.5} \right) (n_1 \cos \alpha_0)^{-1} \right].$$

Согласно формуле, приведённой в [1], фаза отражённой волны для  $s$ -компоненты может быть определена из выражения:

$$\rho_s = 2 \arg \operatorname{tg} \left[ \left( \left[ (n_1^2) \sin^2 \alpha_0 - 1 \right]^{0.5} \right) (n_1 \cos \alpha_0)^{-1} \right]$$

Зависимость разности фаз между падающей и отражённой волнами от угла падения для излучения, поляризованного в плоскости и перпендикулярно плоскости падения при отражении от границы раздела двух сред,  $n_0 > n_m$ ,  $n_0=2.5$ ,  $n_m=1$ , представлена на рис. 1.9.

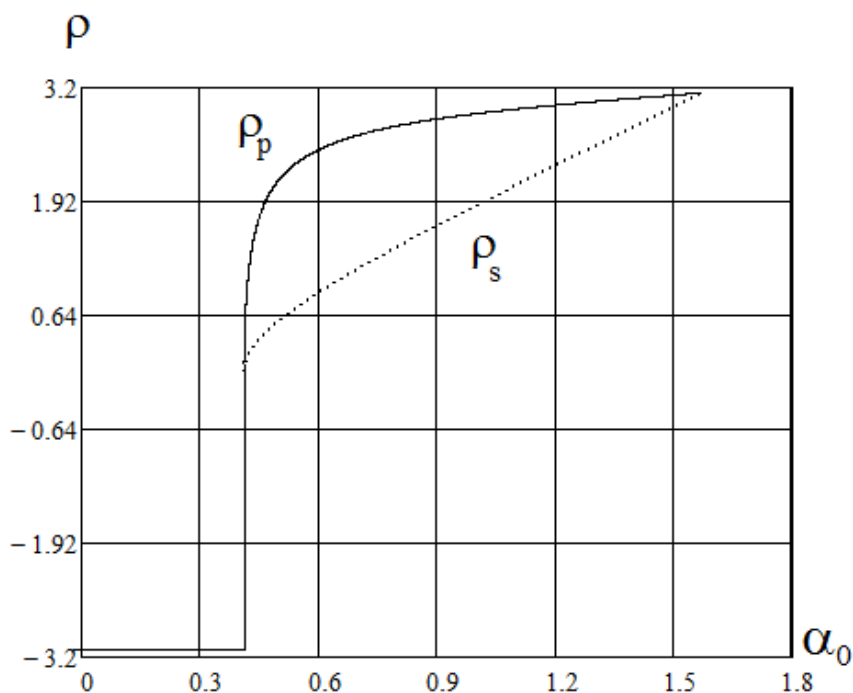


Рисунок 1.9 — Зависимость разности фаз между падающей и отражённой волнами от угла падения для света, поляризованного в плоскости и перпендикулярно плоскости падения при отражении от границы раздела двух сред,  $n_0 > n_m$ ,  $n_0=2.5$ ,  $n_m=1$

**1.1.5 Определение для известной длины волны распределения по углам энергетического коэффициентов отражения для  $s$ - и  $p$ -компонент, в случае, когда в одной из граничащих сред присутствует поглощение**

**Задача 5.** Необходимо определить для известной длины волны распределение по углам энергетического коэффициентов отражения для  $s$ - и  $p$ -компонент, а также для неполяризованного излучения, падающего в заданном диапазоне углов ( $\alpha_0$ ) на границу раздела двух сред с разными показателями преломления, в одной из которых присутствует поглощение. Ход лучей для этой ситуации представлен на рис.1.10.

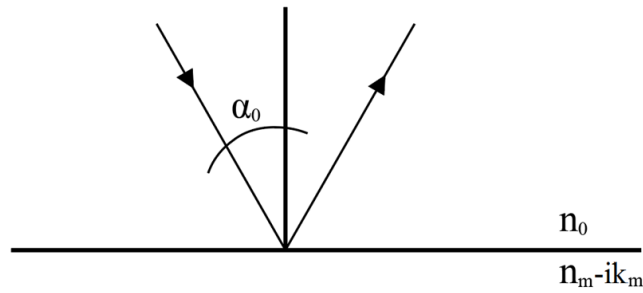


Рисунок 1.10 — Иллюстрация к задачам 5 и 6

**Вариант 5.1.** Излучение падает из среды, характеризуемой показателем преломления ( $n_0$ ), равным 1.0, на среду с показателем преломления ( $n_m - ik_m$ ), равным 1.40-2i. Диапазон падения углов  $0^0 < \alpha_0 < 90^0$ .

**Вариант 5.2.** Излучение падает из среды, характеризуемой показателем преломления ( $n_0$ ), равным 1.0, на среду с показателем преломления ( $n_m - ik_m$ ), равным 1.50-2.5i. Диапазон падения углов  $0^0 < \alpha_0 < 90^0$ .

**Вариант 5.3.** Излучение падает из среды, характеризуемой показателем преломления ( $n_0$ ), равным 1.0, на среду с показателем преломления ( $n_m - ik_m$ ), равным 1.60-1.2i. Диапазон падения углов  $0^0 < \alpha_0 < 90^0$ .

**Вариант 5.4.** Излучение падает из среды, характеризуемой показателем преломления ( $n_0$ ), равным 1.0, на среду с показателем преломления ( $n_m - ik_m$ ), равным 1.70-2.2i. Диапазон падения углов  $0^0 < \alpha_0 < 90^0$ .

**Вариант 5.5.** Излучение падает из среды, характеризуемой показателем преломления ( $n_0$ ), равным 1.30, на среду с показателем преломления ( $n_m - ik_m$ ), равным 1.40-2.8i. Диапазон падения углов  $0^0 < \alpha_0 < 90^0$ .

**Вариант 5.6.** Излучение падает из среды, характеризуемой показателем преломления ( $n_0$ ), равным 1.30, на среду с показателем преломления ( $n_m - ik_m$ ), равным 1.50-2.3i. Диапазон падения углов  $0^0 < \alpha_0 < 90^0$ .

**Вариант 5.7.** Излучение падает из среды, характеризуемой показателем преломления ( $n_0$ ), равным 1.30, на среду с показателем преломления ( $n_m - ik_m$ ), равным 1.60-2.4i. Диапазон падения углов  $0^0 < \alpha_0 < 90^0$ .

**Вариант 5.8.** Излучение падает из среды, характеризуемой показателем преломления ( $n_0$ ), равным 1.0, на среду с показателем преломления ( $n_m - ik_m$ ), равным 1.70-0.2i. Диапазон падения углов  $0^0 < \alpha_0 < 90^0$ .

**Вариант 5.9.** Излучение падает из среды, характеризуемой показателем преломления ( $n_0$ ), равным 1.45 на среду с показателем преломления ( $n_m - ik_m$ ), равным 1.50-1.2i. Диапазон падения углов  $0^0 < \alpha_0 < 90^0$ .

**Вариант 5.10.** Излучение падает из среды, характеризуемой показателем преломления ( $n_0$ ), равным 1.45, на среду с показателем преломления ( $n_m+ik_m$ ), равным  $1.65+0.3i$ . Диапазон падения углов  $0^0 < \alpha_0 < 90^0$ .

**Вариант 5.11.** Излучение падает из среды, характеризуемой показателем преломления ( $n_0$ ), равным 1.45, на среду с показателем преломления ( $n_m-ik_m$ ), равным  $1.75-1.8i$ . Диапазон падения углов  $0^0 < \alpha_0 < 90^0$ .

**Вариант 5.12.** Излучение падает из среды, характеризуемой показателем преломления ( $n_0$ ), равным 1.45, на среду с показателем преломления ( $n_m - ik_m$ ), равным  $1.85-2.7i$ . Диапазон падения углов  $0^0 < \alpha_0 < 90^0$ .

### Пример решения задачи данного вида

В условиях задачи заданы следующие величины:  $n_0=1.0$ ,  $n_m=1.4-2i$  и диапазон углов падения излучения.

Решение задачи следует начать с определения показателей преломления сред для  $s$ - и  $p$ - компонент. Согласно (1.23а),

$$n_0^s = n_0 \cos \alpha_0, \quad n_m^s = n_m \cos \alpha_1 = (n_m + ik_m) \cos \alpha_1, \quad n_0^p = n_0^{-1} \cos \alpha_0, \\ n_m^p = n_m^{-1} \cos \alpha_1 = (n_m + ik_m)^{-1} \cos \alpha_1,$$

где согласно закону Снеллиуса

$$\alpha_1 = \arcsin(n_0 n_m^{-1} \sin \alpha_0) = \arcsin(n_0 (n_m + k_m)^{-1} \sin \alpha_0).$$

Тогда, воспользовавшись выражением (1.23), следует определить амплитудный коэффициент отражения для  $s$ - компоненты по формуле

$$r^s = \frac{n_0^s - n_m^s}{n_0^s + n_m^s} = \frac{n_0 \cos \alpha_0 - n_m \cos \alpha_m}{n_0 \cos \alpha_0 + n_m \cos \alpha_m}$$

и, соответственно, для  $p$ - компоненты

$$r^p = \frac{n_0^p - n_m^p}{n_0^p + n_m^p} = \frac{n_0^{-1} \cos \alpha_0 - n_m^{-1} \cos \alpha_m}{n_0^{-1} \cos \alpha_0 + n_m^{-1} \cos \alpha_m}.$$

А для неполяризованного излучения

$$r = 0.5(r^p + r^s)$$

Для условий данного примера характер распределения энергетических коэффициентов отражения в зависимости от угла падения для разных компонент и неполяризованного излучения представлен на рис. 1.11.

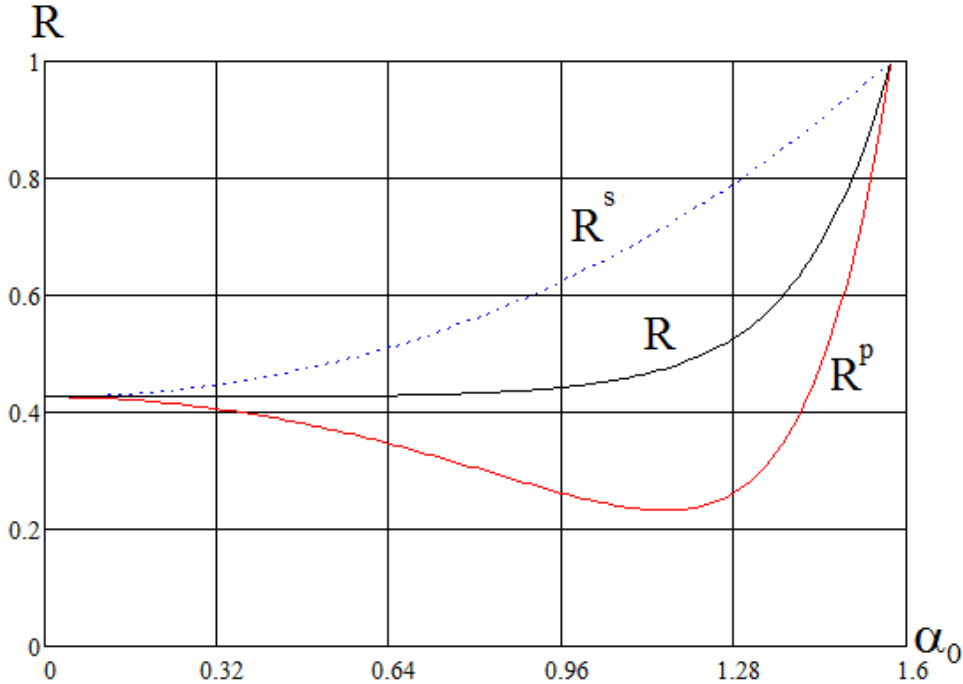


Рисунок 1.11 — Распределение энергетического коэффициента отражения по углам падения излучения для  $s$ - и  $p$ - компонент, при условии, что  $n_0=1.0$ ,  $n_m=1.4+2i$

**1.1.6 Определение спектральной характеристики коэффициента отражения, который возникает на границе раздела двух сред с различными значениями показателя преломления, в одной из сред присутствует поглощение**

**Задача 6.** Необходимо определить спектральную характеристику коэффициента отражения границы раздела двух сред с разными показателями преломления, в одной из которых присутствует поглощение. Комплексный показатель преломления обладает дисперсией. Излучение падает перпендикулярно плоскости поверхности.

**Вариант 6.1.** Излучение падает из среды, имеющей показатель преломления ( $n_0$ ), равный 1.0, перпендикулярно среде с показателем преломления ( $\tilde{n}_m(\lambda)$ ), равным  $\tilde{n}_m(\lambda) = n_m(\lambda) - k_m(\lambda)$  в спектральном диапазоне (300-800) нм.

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_m$	0.14	0.17	0.25	0.53	0.74	0.85	1.20	1.44	1.57	1.81	2.00
$k_m$	2.35	2.55	2.85	2.90	3.03	3.94	4.75	5.50	6.80	7.00	7.10



**Вариант 6.2.** Излучение падает из среды, имеющей показатель преломления ( $n_0$ ), равный 1.0, перпендикулярно среде с показателем преломления ( $\tilde{n}_m(\lambda)$ ), равным  $\tilde{n}_m(\lambda) = n_m(\lambda) - k_m(\lambda)$  в спектральном диапазоне (300-800) нм.

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_m$	0.74	0.67	0.45	1.53	1.74	2.85	3.00	3.44	3.57	4.21	4.40
$k_m$	1.35	1.55	1.85	1.90	2.03	2.94	3.25	3.50	3.80	6.00	6.10

**Вариант 6.3.** Излучение падает из среды, имеющей показатель преломления ( $n_0$ ), равный 1.0, перпендикулярно среде с показателем преломления ( $\tilde{n}_m(\lambda)$ ), равным  $\tilde{n}_m(\lambda) = n_m(\lambda) - k_m(\lambda)$  в спектральном диапазоне (300-800) нм.

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_m$	0.24	0.47	0.55	0.63	0.74	0.89	1.10	1.44	1.57	1.81	2.00
$k_m$	2.35	3.65	3.85	3.90	4.03	4.44	4.75	5.20	6.50	7.10	7.50

**Вариант 6.4.** Излучение падает из среды, имеющей показатель преломления ( $n_0$ ), равный 1.0, перпендикулярно среде с показателем преломления ( $\tilde{n}_m(\lambda)$ ), равным  $\tilde{n}_m(\lambda) = n_m(\lambda) - k_m(\lambda)$  в спектральном диапазоне (300-800) нм.

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_m$	0.34	0.47	0.55	0.73	0.94	1.25	1.40	1.74	1.97	2.81	3.00
$k_m$	2.35	2.55	2.85	2.90	3.03	3.94	4.75	5.50	6.80	7.00	7.10

**Вариант 6.5.** Излучение падает из среды, имеющей показатель преломления ( $n_0$ ), равный 1.0, перпендикулярно среде с показателем преломления ( $\tilde{n}_m(\lambda)$ ), равным  $\tilde{n}_m(\lambda) = n_m(\lambda) - k_m(\lambda)$  в спектральном диапазоне (300-800) нм.

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_m$	0.04	0.07	0.15	0.33	0.44	0.65	1.00	1.24	1.37	1.81	2.00
$k_m$	2.05	2.05	2.55	2.70	3.03	3.54	3.75	4.50	4.80	5.00	5.10

**Вариант 6.6.** Излучение падает из среды, имеющей показатель преломления ( $n_0$ ), равный 1.0, перпендикулярно среде с показателем преломления ( $\tilde{n}_m(\lambda)$ ), равным  $\tilde{n}_m(\lambda) = n_m(\lambda) - k_m(\lambda)$  в спектральном диапазоне (300-800) нм.

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_m$	0.64	0.77	0.85	0.93	1.14	1.55	1.70	1.94	2.17	2.30	2.80
$k_m$	2.05	2.05	2.55	2.70	3.03	3.54	3.75	4.50	4.80	5.00	5.10

**Вариант 6.7.** Излучение падает из среды, имеющей показатель преломления ( $n_0$ ), равный 1.0, перпендикулярно среде с показателем преломления ( $\tilde{n}_m(\lambda)$ ), равным  $\tilde{n}_m(\lambda) = n_m(\lambda) - k_m(\lambda)$  в спектральном диапазоне (300-800) нм.

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_m$	0.64	0.77	0.85	0.93	1.14	1.55	1.70	1.94	2.17	2.30	2.80
$k_m$	0.95	1.25	1.55	1.90	2.03	2.94	3.25	3.50	4.80	5.30	5.90

**Вариант 6.8.** Излучение падает из среды, имеющей показатель преломления ( $n_0$ ), равный 1.0, перпендикулярно среде с показателем преломления ( $\tilde{n}_m(\lambda)$ ), равным  $\tilde{n}_m(\lambda) = n_m(\lambda) - k_m(\lambda)$  в спектральном диапазоне (300-800) нм.

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_m$	0.74	0.67	0.45	1.53	1.74	2.85	3.00	3.44	3.57	4.21	4.40
$k_m$	0.95	1.25	1.55	1.90	2.03	2.94	3.25	3.50	4.80	5.30	5.90

**Вариант 6.9.** Излучение падает из среды, имеющей показатель преломления ( $n_0$ ), равный 1.0, перпендикулярно среде с показателем преломления ( $\tilde{n}_m(\lambda)$ ), равным  $\tilde{n}_m(\lambda) = n_m(\lambda) - k_m(\lambda)$  в спектральном диапазоне (300-800) нм.

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_m$	0.24	0.47	0.55	0.63	0.74	0.89	1.10	1.44	1.57	1081	2.00
$k_m$	2.05	2.05	2.55	2.70	3.03	3.54	3.75	4.50	4.80	5.00	5.10

**Вариант 6.10.** Излучение падает из среды, имеющей показатель преломления ( $n_0$ ), равный 1.0, перпендикулярно среде с показателем преломления ( $\tilde{n}_m(\lambda)$ ), равным  $\tilde{n}_m(\lambda) = n_m(\lambda) - k_m(\lambda)$  в спектральном диапазоне (300-800) нм.

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_m$	0.34	0.47	0.55	0.73	0.94	1.25	1.40	1.74	1.97	2.81	3.00
$k_m$	2.05	2.05	2.55	2.70	3.03	3.54	3.75	4.50	4.80	5.00	5.10

**Вариант 6.11.** Излучение падает из среды, имеющей показатель преломления ( $n_0$ ), равный 1.0, перпендикулярно среде с показателем преломления ( $\tilde{n}_m(\lambda)$ ), равным  $\tilde{n}_m(\lambda) = n_m(\lambda) - k_m(\lambda)$  в спектральном диапазоне (300-800) нм.

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_m$	0.04	0.07	0.15	0.33	0.44	0.65	1.00	1.24	1.37	1.81	2.00
$k_m$	2.35	2.55	2.85	2.90	3.03	3.94	4.75	5.50	6.80	7.00	7.10

**Вариант 6.12.** Излучение падает из среды, имеющей показатель преломления ( $n_0$ ), равный 1.0, перпендикулярно среде с показателем преломления ( $\tilde{n}_m(\lambda)$ ), равным  $\tilde{n}_m(\lambda) = n_m(\lambda) - k_m(\lambda)$  в спектральном диапазоне (300-800) нм.

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_m$	0.64	0.77	0.85	0.93	1.14	1.55	1.70	1.94	2.17	2.30	2.80
$k_m$	2.35	3.65	3.85	3.90	4.03	4.44	4.75	5.20	6.50	7.10	7.50

## Пример решения задачи данного вида

В условиях задачи заданы следующие величины:  $n_0=1.0$  и  $\tilde{n}_m(\lambda) = n_m(\lambda) - k_m(\lambda)$

$\lambda$ , нм	300	340	380	436	492	546	650	700	800
$n_m$	0.25	0.31	0.37	0.47	0.64	0.82	1.30	1.55	1.99
$k_m$	3.33	3.80	4.25	4.84	5.50	5.99	7.11	7.00	7.05

Решение задачи следует начать с задания массивов  $n_m$  и  $k_m$  для заданных длин волн, далее расчёт коэффициента отражения осуществляется согласно зависимости (1.47а). Спектральная характеристика энергетического коэффициента рассматриваемого покрытия при нормальном падении излучения представлена на рис. 1.12. Фрагмент «а» — спектральная характеристика энергетического коэффициента в широком энергетическом диапазоне, фрагмент «б» — спектральная характеристика энергетического коэффициента в узком энергетическом диапазоне.

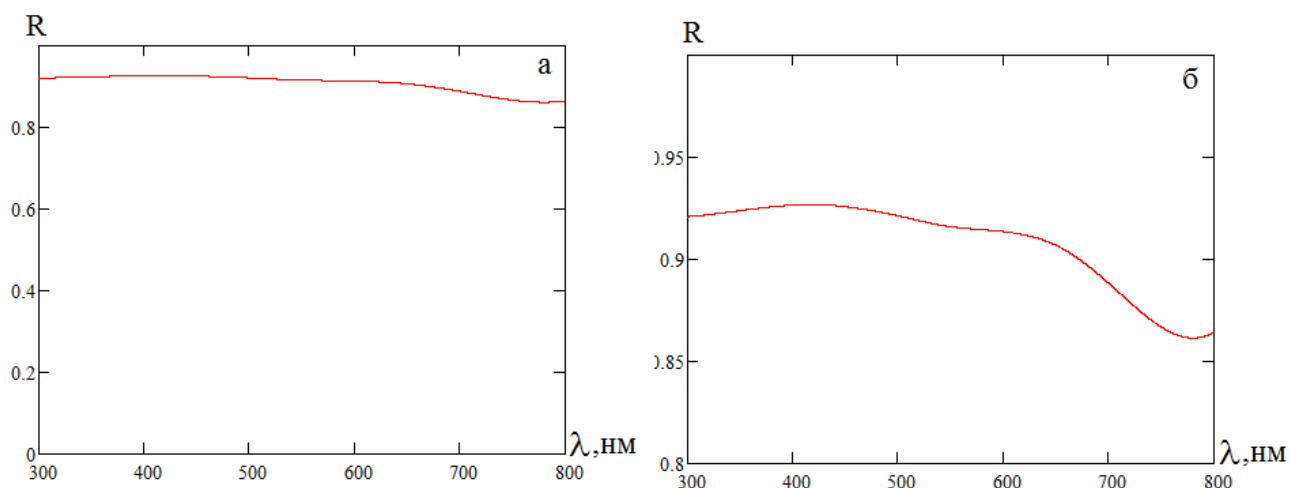


Рисунок 1.12 — Спектральная характеристика энергетического коэффициента рассматриваемого покрытия при нормальном падении излучения. Фрагмент «а» — спектральная характеристика энергетического коэффициента в широком энергетическом диапазоне, фрагмент «б» — спектральная характеристика энергетического коэффициента в узком энергетическом диапазоне

## 2 ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ СЛОЙ, РАЗМЕЩЁННЫЙ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ДВУХ СРЕД, ПОКАЗАТЕЛИ ПРЕЛОМЛЕНИЯ КОТОРЫХ НЕ РАВНЫ

Пусть на границе раздела двух сред присутствует некий непоглощающий, изотропный слой, основными характеристиками которого является показатель преломления материала, из которого изготовлен слой,  $n_1$ , его геометрическая  $d_1$ , его оптическая  $n_1 d_1$  и его фазовая толщина слоя  $\varphi_1 = 2\pi n_1 d_1 (\lambda)^{-1}$  (рис. 2.1).

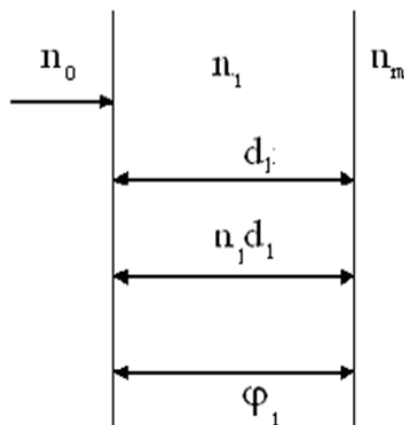


Рисунок 2.1 — Схема однослойного непоглощающего покрытия

На начальном этапе будем считать, что показатель преломления слоя постоянен по всей толщине и поглощение в материале слоя отсутствует. Обрамляющие слой среды являются полубесконечными по отношению к слою. Одной средой является материал, из которого изготовлен оптический элемент, а второй – окружающая среда. Возникновение этого слоя на границе раздела может произойти естественным путём в процессе старения, когда на его поверхности начинается частичное окисление материала, что приводит к изменению показателя преломления. Геометрическая толщина этого слоя мала, а показатель преломления будет не постоянен по толщине. Вторая причина возникновения слоя, отличного по своему составу от состава стекла, наличие нарушенного слоя на его поверхности, возникающего в процессе полирования и шлифования. Эти два слоя имеют некое распределение показателя преломления по толщине, которая составляет несколько нанометров. Такие слои не удовлетворяют тем ограничениям, которые были введены ранее. При выполнении практических заданий необходимо будет анализировать оптические параметры слоя, толщина которого соизмерима с длиной волны, а показатель преломления постоянен по всей толщине. Такие слои изготавливаются физически или химическими способами, и толщина их контролируется с высокой точностью. Рассмотрим, как этот слой будет влиять на оптические параметры границы раздела стекло воздух.

## 2.1 Нормальное падение света на прозрачный изотропный слой

Рассмотрим нормальное падение излучения на границу раздела двух сред с показателями преломления  $n_0$  и  $n_m$ . На этой границе расположен изотропный, однородный, бесконечно протяжённый плоскопараллельный слой, сформированный из материала с показателем преломления  $n_1$ , имеющий геометрическую толщину  $d_1$ , оптическую толщину  $n_1 d_1$  и фазовую толщину  $\varphi_1 = 2\pi n_1 d_1 (\lambda)^{-1}$ . Присутствие этого слоя на поверхности оптического элемента приводит к образованию двух границ раздела между средами с показателями преломления  $n_0 - n_1$  и  $n_1 - n_m$ . В этом разделе показатели преломления материалов рассматриваются без учёта дисперсии.

Амплитудный коэффициент отражения такого слоя в соответствии с [2] будет равен:

$$r = \frac{(n_0 m_{11} - n_m m_{22}) + i(n_0 n_m m_{12} - m_{21})}{(n_0 m_{11} + n_m m_{22}) + i(n_0 n_m m_{12} + m_{21})}, \quad (2.1)$$

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

$$m_{11} = m_{22} = \cos \varphi_1, \quad m_{12} = \frac{1}{n_1} \sin \varphi_1, \quad m_{21} = n_1 \sin \varphi_1. \quad (2.2)$$

При записи выражения для определения амплитудного коэффициента отражения нетрудно заметить, что в общем случае это комплексное число, т.е. это величина  $r = |r| e^{-i\varphi}$ . Однако не следует забывать, что на одной границе раздела амплитудный коэффициент отражения, всегда действительное число, либо положительное, либо отрицательное. Если величина  $r$ , число положительное, то разность фаз между падающим и отражённым излучением равна нулю, а если отрицательное, то эта разность фаз будет равна величине  $\pi$ . 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  $\pi$ , которое меняется в зависимости от длины волны.

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

$$R = |r|^2. \quad (2.3)$$

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

$$R = \frac{(n_0 m_{11} - n_m m_{22})^2 + (n_0 n_m m_{12} - m_{21})^2}{(n_0 m_{11} + n_m m_{22})^2 + (n_0 n_m m_{12} + m_{21})^2}. \quad (2.4)$$

Энергетический коэффициент пропускания равен:

$$T = \frac{4n_0n_m}{(n_0m_{11} + n_m m_{22})^2 + (n_0n_m m_{12} + m_{21})^2}. \quad (2.5)$$

Эта форма записи, следствие унимодулярности матрицы преобразования. Следует помнить, что унимодулярная матрица — это такая матрица, детерминант которой равен единице. Детерминант матрицы для прозрачных сред равен

$$m_{11}m_{22} + m_{12}m_{21} = 1. \quad (2.6)$$

Произведение унимодулярных матриц это тоже унимодулярная матрица. Кроме того, для матриц преобразования, описывающих прозрачные слои, в которых отсутствует поглощение, диагональные элементы матрицы, всегда действительные числа, а элементы, лежащие на побочной диагонали, всегда мнимые числа. В общем случае, когда в слое присутствует поглощение, это утверждение не справедливо, все элементы матрицы, характеризующей такой слой, комплексные числа.

Анализ выражений (2.4) и (2.5), служащих для определения энергетических коэффициентов отражения и пропускания одного слоя, расположенного на материале с известным показателем преломления, показывает, что обе зависимости являются дробно-линейными функциями. Такие зависимости сложны для анализа, и поэтому удобнее рассмотреть функцию, обратную пропусканию, т.е. функцию следующего вида:

$$G_1 = T^{-1}. \quad (2.7)$$

Функция  $G_1$  будет квазилинейной функцией матричных элементов. Для упрощения анализа влияния параметров слоя на энергетические коэффициенты отражения и пропускания можно ввести функцию:

$$G = 4n_0n_m G_1. \quad (2.8)$$

Введённый постоянный множитель  $4n_0n_m$  практически не влияет на результаты анализа, в этом случае функция  $G$  будет иметь вид:

$$G_1 = (n_0m_{11} + n_m m_{22})^2 + (n_0n_m m_{12} + m_{21})^2. \quad (2.9)$$

Вследствие закона сохранения энергии  $R+T=1$ , поскольку рассматриваются поглощающие среды,  $R$  и  $T$  – дополнительные функции; а введённая  $G$  – функция есть функция, обратная энергетическому коэффициенту пропускания. Экстремумы функций энергетических коэффициентов отражения и пропускания ( $R$ ,  $T$ ) расположены на одной длине волны, но не равны друг другу. Максимальное значение энергетического коэффициента отражения  $R$  соответствует минимальному значению энергетического коэффициента пропускания  $T$ , и наоборот. Величина  $G$  будет иметь вид:

$$G_1 = (n_0 - n_m)^2 \cos^2 \varphi_1 + \left( \frac{n_0n_m}{n_1} + n_1 \right)^2 \sin^2 \varphi_1. \quad (2.10)$$

Эту функция можно написать в более простом для анализа виде, для чего следует перейти к косинусу двойного угла фазовой толщины для устранения

квадратов косинусов и синусов. В этом случае рассматриваемая функция примет вид:

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

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

где

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

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

Полученная функция — периодическая, её период  $-\pi$  и имеет экстремумы, когда аргумент этой функции, величина  $(2\pi n_1 d_1 \lambda^{-1})$ , кратен чётному или нечётному числу  $\pi$ . Экстремумы наблюдаются при  $\varphi_1 = 0,5k\pi$ . В этом случае функция будет иметь соответствующие экстремумы, причём вид экстремума будет определяться знаком при коэффициенте  $\cos 2\varphi_1$ . Функции R и T, так же, как функция G, будут иметь экстремумы при фазовой толщине слоя  $\varphi_1 = 0, 0,5\pi, \pi, 1,5\pi, 2\pi, \dots$ . При  $\varphi_1 = 0$  это будет либо  $A+B$ , если величина B больше нуля, либо  $A-B$ , если величина «B» меньше нуля. Тогда, в зависимости от знака величины B, зависимость функции G от фазовой толщины слоя представлена на рис. 2.2. Для значений величины  $B > 0$  функция G имеет минимум при значении фазовой толщины  $\varphi_1 = 0,5\pi$ .

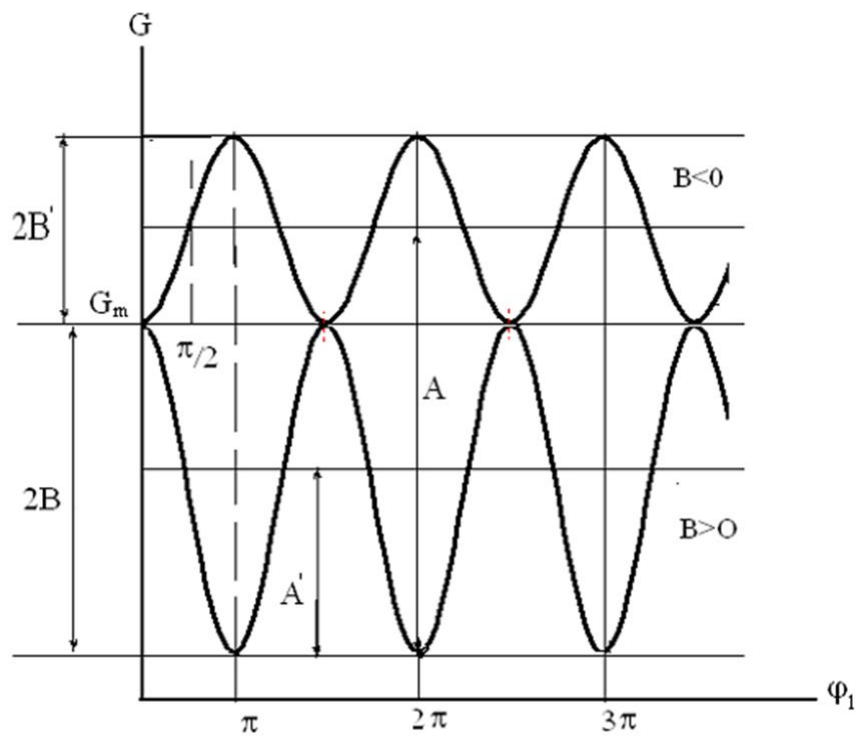


Рисунок 2.2 — Зависимость функции G от фазовой толщины слоя

Поскольку функция  $G$  — обратна распределению энергетического коэффициента пропускания  $T$ , то в точках, где функция  $G$  имеет максимальное значение, функция  $T$  будет иметь минимальное значение (рис. 2.3).

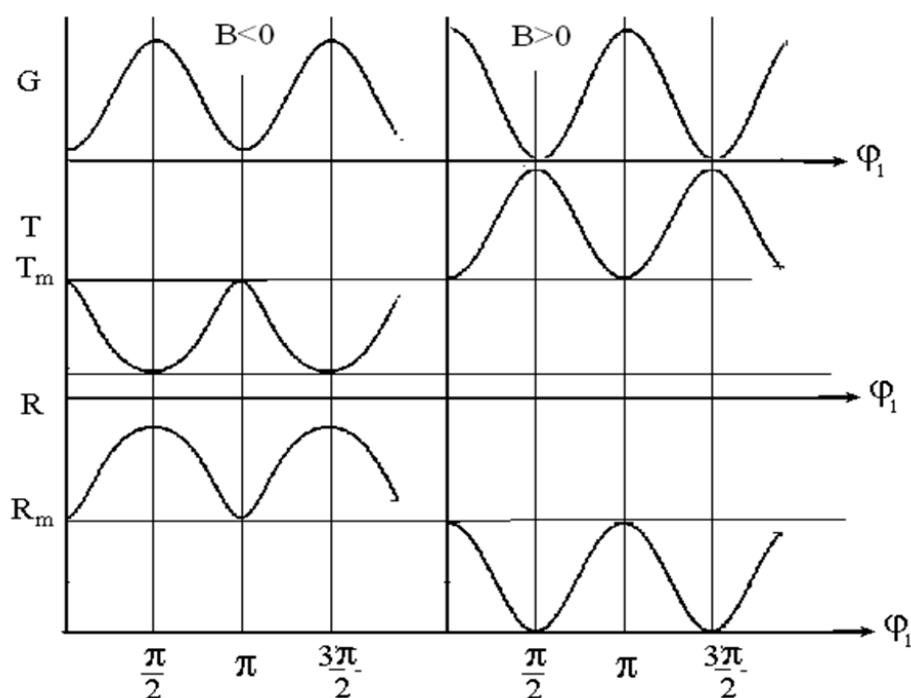


Рисунок 2.3 — Зависимости энергетических коэффициентов отражения и пропускания, а также функции  $G$  от фазовой толщины слоя

Таким образом, если величина  $B > 0$ , то при увеличении фазовой толщины слоя энергетический коэффициент пропускания начинает возрастать, а энергетический коэффициент отражения уменьшаться. Этот факт достаточно интересен. Энергетический коэффициент пропускания оптического элемента, на котором сформирован один непоглощающий слой, по мере увеличения фазовой толщины слоя может возрастать, а когда величина коэффициента  $B < 0$ , энергетический коэффициент пропускания будет падать, в первом случае покрытие имеет название «просветляющее», во втором — «зеркальное». В первом случае энергетический коэффициент отражения оптического элемента уменьшается, во втором он увеличивается. Следовательно, один слой может работать и как увеличивающий отражение (зеркальный), и как слой, уменьшающий отражение (просветляющий, антиотражающий). Это определяется только знаком перед коэффициентом  $B$ . Рассматриваемый коэффициент зависит от показателей преломления обрамляющих сред и материала, из которого изготовлен слой:

$$B = (n_0 - n_m)^2 - (n_0 n_m n_1^{-1} + n_1)^2. \quad (2.11)$$

После преобразования этого уравнения получаем:

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



В итоге имеем:

$$B = n_1^{-2} (n_1 - n_m)(n_0 - n_1)(n_1 + n_m)(n_0 + n_1). \quad (2.12)$$

Как видно из зависимости (2.12), знак величины  $B$  определяется разностью показателей преломления материалов, из которых изготовлен оптический элемент, расположенный на нём слой и среды, из которой падает излучение. Коэффициент  $B$  в общем случае будет положительным, когда  $n_0 < n_1 < n_m$ , отрицательным, когда  $n_0 > n_1 > n_m$ .

## 2.2 Однослойные покрытия при наклонном падении излучения

Рассмотрим теперь свойства однослойного покрытия, сформированного на оптическом элементе, при наклонном падении излучения. Пусть плоская волна падает под некоторым углом 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  $\varphi_1 = 2\pi n_1 d_1 (\lambda)^{-1}$ . При падении излучения под углом начинает меняться разность хода между интерферирующими лучами в 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  $\alpha_1$  – угол распространения излучения в слое, этот угол легко определяется из закона Снеллиуса:  $n_0 \sin \alpha_0 = n_1 \sin \alpha_1$ . Далее рассмотрим ситуацию, связанную с отражением света при наклонном падении, используя два подхода: так называемые рекуррентный и матричный методы и сравним результаты этих подходов.

Рассмотрим рекуррентный метод расчёта коэффициента отражения на границе двух сред. Граница раздела сред (среда, из которой падает излучение – слой) 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 коэффициенты отражения, определяемые формулой Френеля, которые могут быть определены из следующих соотношений:

$$r_1^{p,s} = \frac{\tilde{n}_0 - \tilde{n}_1}{\tilde{n}_0 + \tilde{n}_1}, \quad r_2^{p,s} = \frac{\tilde{n}_1 - \tilde{n}_m}{\tilde{n}_1 + \tilde{n}_m}, \quad (2.13)$$

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

$$\tilde{n}_i = \begin{cases} n_i \cos \alpha_i & s - \text{поляризации,} \\ n_i^{-1} \cos \alpha_i & p - \text{поляризации.} \end{cases} \quad i = 0, 1, m. \quad (2.14)$$

Изменение амплитудного коэффициента отражения в зависимости от угла падения излучения для этих границ раздела представлено на рис. 2.4.

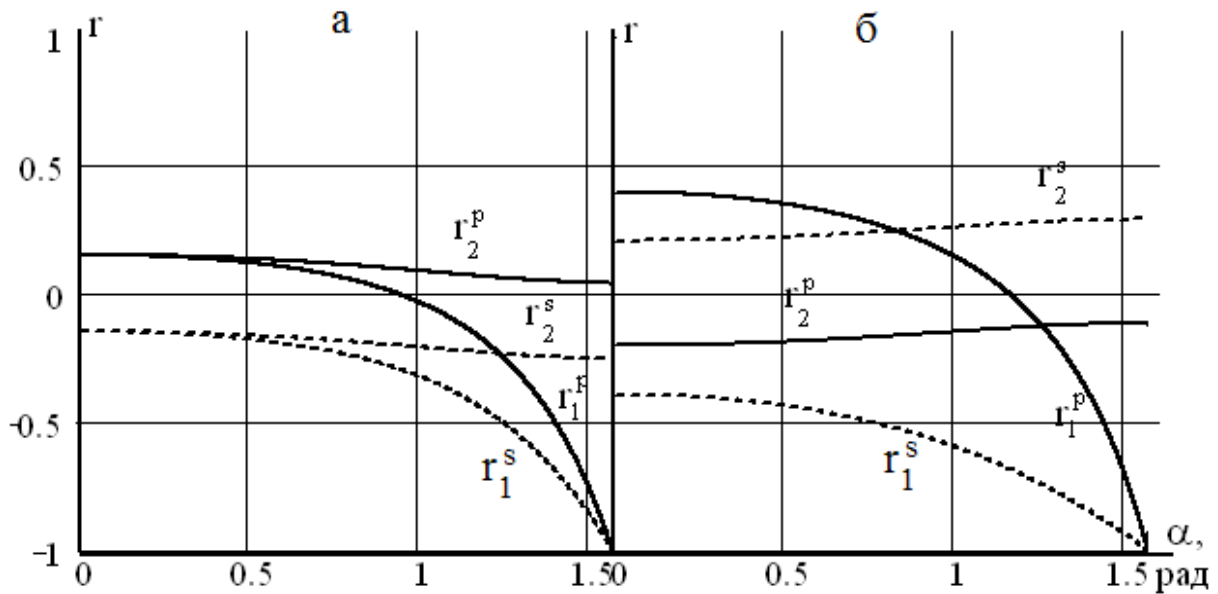


Рисунок 2.4 — Амплитудные коэффициенты отражения границ раздела двух сред для излучения, поляризованного в плоскости -  $r_p$  и перпендикулярно плоскости -  $r_s$  падения для первой и второй границ раздела (а) сред с показателями преломления:  $n_0=1, n_1=1.35, n_m=1.52$ , (б) -  $n_0=1, n_1=2.30, n_m=1.52$

Пересечение кривой, соответствующей характеру 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 материала, из которого изготовлен оптический элемент, так и меньше показателя преломления этого материала (рис. 2.4). Эти два варианта оказывают существенное влияние на распределения энергетического коэффициента отражения. 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 формируется слой из материала 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. 2.4а). 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 излучение 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. 2.4б). 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

$$r^{p,s} = \frac{\frac{\tilde{n}_0^{p,s} - \tilde{n}_1^{p,s}}{\tilde{n}_0^{p,s} + \tilde{n}_1^{p,s}} - \frac{\tilde{n}_1^{p,s} - \tilde{n}_m^{p,s}}{\tilde{n}_1^{p,s} + \tilde{n}_m^{p,s}} \exp(2i\tilde{\varphi}_1)}{1 + \frac{\tilde{n}_0^{p,s} - \tilde{n}_1^{p,s}}{\tilde{n}_0^{p,s} + \tilde{n}_1^{p,s}} \times \frac{\tilde{n}_1^{p,s} - \tilde{n}_m^{p,s}}{\tilde{n}_1^{p,s} + \tilde{n}_m^{p,s}} \exp(2i\tilde{\varphi}_1)}}{(2.15)}$$

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:

$$\begin{cases} R_{p \min} = \frac{n_1^2 \cos \alpha_0 \cos \alpha_m - n_0 n_m \cos^2 \alpha_1}{n_1^2 \cos \alpha_0 \cos \alpha_m + n_0 n_m \cos^2 \alpha_1} - & p - \text{ поляризация;} \\ R_{s \min} = \frac{n_1^2 \cos^2 \alpha_1 - n_0 n_m \cos \alpha_0 \cos \alpha_m}{n_1^2 \cos^2 \alpha_1 + n_0 n_m \cos \alpha_0 \cos \alpha_m} - & s - \text{ поляризация.} \end{cases} \quad (2.16)$$

Представленные выражения позволяют определить значения энергетических 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  $\pi$ .

При этом:

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

а

$$R_{p \min} = R_{s \min} = \left( \frac{n_0 \sqrt{n_m^2 - n_0^2 \sin^2 \alpha_0} \cdot \cos \alpha_0 + n_0^2 \sin^2 \alpha_0 - n_0 n_m}{n_0 \sqrt{n_m^2 - n_0^2 \sin^2 \alpha_0} \cdot \cos \alpha_0 - n_0^2 \sin^2 \alpha_0 + n_0 n_m} \right)^2. \quad (2.17)$$

На рис. 2.5 представлена зависимость изменения энергетического коэффициента отражения от угла падения излучения для случая, когда между показателями преломления сред выполняется соотношение  $n_0 n_m = n_1^2$ .

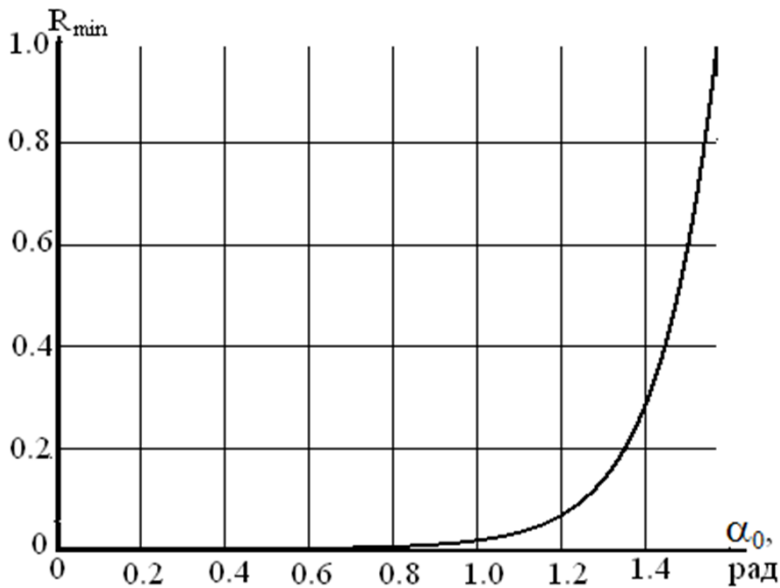


Рисунок 2.5 — Зависимость минимального коэффициента отражения однослойного просветляющего покрытия, оптическая толщина которого меняется пропорционально  $(\cos \alpha_0)^{-1}$ , а показатель преломления слоя  $(n_0 n_m)^{-0.5}$  от угла падения излучения

Если условие  $n_1^2 = n_0 n_m$  не выполняется, амплитудные коэффициенты отражения для излучения с разными состояниями поляризации будут отличаться, действительно:

$$\left\{ \begin{array}{l} r_s = \frac{\frac{n_0 \cos \alpha_0 - n_1 \cos \alpha_1}{n_0 \cos \alpha_0 + n_1 \cos \alpha_1} - \frac{n_1 \cos \alpha_1 - n_m \cos \alpha_m \exp(2i\tilde{\varphi}_1)}{n_1 \cos \alpha_1 + n_m \cos \alpha_m}}{1 + \frac{n_0 \cos \alpha_0 - n_1 \cos \alpha_1}{n_0 \cos \alpha_0 + n_1 \cos \alpha_1} \times \frac{n_1 \cos \alpha_1 - n_m \cos \alpha_m \exp(2i\tilde{\varphi}_1)}{n_1 \cos \alpha_1 + n_m \cos \alpha_m}}, \\ r_p = \frac{\frac{n_1 \cos \alpha_0 - n_0 \cos \alpha_1}{n_1 \cos \alpha_0 + n_0 \cos \alpha_1} - \frac{n_m \cos \alpha_1 - n_1 \cos \alpha_m \exp(2i\tilde{\varphi}_1)}{n_m \cos \alpha_1 + n_1 \cos \alpha_m}}{1 + \frac{n_1 \cos \alpha_0 - n_0 \cos \alpha_1}{n_1 \cos \alpha_0 + n_0 \cos \alpha_1} \times \frac{n_m \cos \alpha_1 - n_1 \cos \alpha_m \exp(2i\tilde{\varphi}_1)}{n_m \cos \alpha_1 + n_1 \cos \alpha_m}}. \end{array} \right. \quad (2.18)$$

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:

$$R = \frac{\left(\frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1}\right)^2 + \left(\frac{n_1 - n_m}{n_1 + n_m}\right)^2 - 2\left(\frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1}\right)\left(\frac{n_1 - n_m}{n_1 + n_m}\right)\cos 2\varphi_1}{1 + \left(\frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1}\right)^2 + \left(\frac{n_1 - n_m}{n_1 + n_m}\right)^2 - 2\left(\frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1}\right)\left(\frac{n_1 - n_m}{n_1 + n_m}\right)\cos 2\varphi_1}. \quad (2.19)$$

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 положить оптическую толщину слоя равной  $\lambda_0/4$ , то фазовая толщина слоя может быть записана в таком 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:

$$\lambda = \lambda_0 \cos\left(\arcsin\left(n_0 n_1^{-1} \sin \alpha_0\right)\right). \quad (2.20)$$

Отсюда следует, что при увеличении угла падения излучения экстремум энергетического коэффициента отражения смещается в коротковолновую часть спектра, а его величина определяется выражением (2.17). Очевидно, что поскольку зависимости коэффициента отражения одной границы раздела от угла падения различаются (см. рис. 2.4), то коэффициент отражения слоя для  $p$ -компоненты будет меньше, а для  $s$ -компоненты всегда будет больше.

При наклонном падении излучения спектральные зависимости энергетического коэффициента отражения для разных состояний поляризации излучения будут различными.

Анализ спектральных характеристик энергетического коэффициента отражения для различных поляризаций был рассмотрен на основе рекуррентных соотношений. Далее рассмотрим влияние наклонного падения излучения на слой, используя матричные соотношения. Матрица интерференции для такой системы имеет следующий вид [3]:

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

где

$$\tilde{n}_1 = \begin{cases} n_1 \cos \alpha_1 & s\text{-поляризация} \\ n_1^{-1} \cos \alpha_1 & p\text{-поляризация,} \end{cases} \quad (2.21)$$

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

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

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

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

$$\left\{ \begin{array}{l} r^s = \frac{(n_0^s m_{11} - n_m^s m_{22}) + i(n_0^s n_m^s m_{12} - m_{21})}{(n_0^s m_{11} + n_m^s m_{22}) + i(n_0^s n_m^s m_{12} + n_1^s m_{21})}, \\ r^p = \frac{(n_0^p m_{11} - n_m^p m_{22}) + i(n_0^p n_m^p m_{12} - m_{21})}{(n_0^p m_{11} + n_m^p m_{22}) + i(n_0^p n_m^p m_{12} + n_1^p m_{21})}. \end{array} \right. \quad (2.22)$$

Здесь определение амплитудного коэффициента отражения представлено через элементы матрицы интерференции, что позволяет определить 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, что рассмотренные ранее экстремумы амплитудных коэффициентов отражения для  $s$ - и  $p$ - компонент будут находиться на разных длинах волн.

$$\left\{ \begin{array}{l} r^s = \frac{(n_0 \cos \alpha_0 - n_m \cos \alpha_m) \cos \tilde{\varphi}_1 + i \left( \frac{n_0 n_m \cos \alpha_0 \cos \alpha_m}{n_1 \cos \alpha_1} - n_1 \cos \alpha_1 \right) \sin \tilde{\varphi}_1}{(n_0 \cos \alpha_0 + n_m \cos \alpha_m) \cos \tilde{\varphi}_1 + i \left( \frac{n_0 n_m \cos \alpha_0 \cos \alpha_m}{n_1 \cos \alpha_1} + n_1 \cos \alpha_1 \right) \sin \tilde{\varphi}_1}, \\ r^p = \frac{\left( \frac{\cos \alpha_0}{n_0} - \frac{\cos \alpha_m}{n_m} \right) \cos \tilde{\varphi}_1 + i \left( \frac{\cos \alpha_0 \cos \alpha_m}{n_0 n_m \cos \alpha_1} - \frac{\cos \alpha_1}{n_1} \right) \sin \tilde{\varphi}_1}{\left( \frac{\cos \alpha_0}{n_0} + \frac{\cos \alpha_m}{n_m} \right) \cos \tilde{\varphi}_1 + i \left( \frac{\cos \alpha_0 \cos \alpha_m}{n_0 n_m \cos \alpha_1} + \frac{\cos \alpha_1}{n_1} \right) \sin \tilde{\varphi}_1}. \end{array} \right. \quad (2.22a)$$

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

### 2.3 Оптические характеристики поглощающего слоя

Определим оптические характеристики излучения, отражённого и прошедшего через покрытие, обладающего поглощением излучения (рис. 2.6). Такой слой характеризуется показателем преломления  $n_1$ , коэффициентом поглощения  $k_1$  [3], 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. 2.6). 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 коэффициент поглощения не меняются.

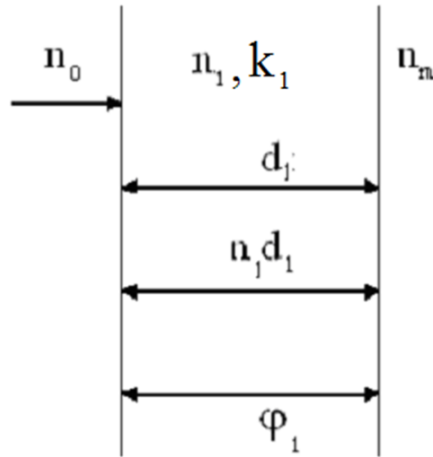


Рисунок 2.6 — Схема однослойного покрытия

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, получаются всё 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:  $r_1, r_2$  — коэффициенты отражения, определяемые формулой Френеля, 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 зависят не только от показателей преломления материала, но отражения являются комплексными величинами, т.е. эти величины могут быть определены в следующем виде:

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

Величины  $\rho_1$  и  $\rho_2$  будут аргументами функций  $r_1$  и  $r_2$ .

$$\rho_1 = \operatorname{arctg} \frac{2n_0k_1}{n_1^2 - n_0^2 + k_1^2},$$

$$\rho_2 = \operatorname{arctg} \frac{2n_mk_1}{n_m^2 - n_1^2 + k_1^2},$$

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

Значение амплитудного коэффициента отражения определяется из следующей зависимости:

$$r = \frac{|r_1|e^{i\rho_1} + |r_2|\exp(-2i(2\pi n_1d_1\lambda^{-1} + \rho_2))\exp(-4\pi k_1d_1\lambda^{-1})}{1 + |r_1||r_2|\exp(-2i(2\pi n_1d_1\lambda^{-1} + \rho_2 + \rho_1))\exp(-4\pi k_1d_1\lambda^{-1})}. \quad (2.23)$$

Выражение (2.23) показывает, что в отличие от системы, в которой отсутствует поглощение, перед фазовым множителем присутствует ещё один множитель, который определяет ослабление амплитуды излучения, проходящего через слой. Учитывая (2.23), можно записать выражение, определяющие энергетический коэффициент отражения и энергетический коэффициент пропускания для поглощающего слоя:

$$\begin{aligned} R = |r|^2 = \\ = \frac{|r_1|^2 - 2|r_1||r_2|\exp\left(-\frac{4\pi k_1d_1}{\lambda}\right) \times \cos\left(\frac{4\pi n_1d_1}{\lambda} + \rho_2 + \rho_1\right) + |r_2|\exp\left(-\frac{8\pi k_1d_1}{\lambda}\right)}{1 + |r_1||r_2|\exp\left(-\frac{8\pi k_1d_1}{\lambda}\right) - 2|r_1||r_2|\exp\left(-\frac{4\pi k_1d_1}{\lambda}\right) \times \cos\left(\frac{4\pi n_1d_1}{\lambda} + \rho_2 + \rho_1\right)} \end{aligned} \quad (2.24)$$

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

$$T = \frac{A \exp\left(-\frac{2\pi k_1d_1}{\lambda}\right)}{1 + |r_1|^2|r_2|^2 \exp\left(-\frac{8\pi k_1d_1}{\lambda}\right) - 2|r_1||r_2|\exp\left(-\frac{4\pi k_1d_1}{\lambda}\right) \cos\left(\frac{4\pi n_1d_1}{\lambda} + \rho_1 + \rho_2\right)}, \quad (2.25)$$

$$\text{где } A = 16n_0n_m \frac{1}{(n_0 + n_1)^2 + k_1^2} \cdot \frac{(n_1^2 + k_1^2)}{(n_1 + n_m)^2 + k_1^2}.$$

Очевидно, что эти величины являются функциями длины волны и оптических постоянных слоя.

Анализ этих выражений показывает, что экстремумы энергетического коэффициента отражения и экстремумы энергетического коэффициента пропускания не совпадают в шкале длин волн (в шкале частот). Для определения положения экстремумов в шкале длин волн следует определить производные значений энергетического коэффициента 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. Эти выражения достаточно громоздки и сложны для анализа.

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:

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

приравнивая 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:

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

если

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

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:

$$\begin{aligned} m_{11} = m_{22} &= \cos \varphi_1 = \cos \left( \frac{2\pi(n_1 - ik_1)d_1}{\lambda} \right) = \cos \left( \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} - \frac{2i\pi d_1 k_1}{\lambda} \right), \\ m_{12} &= \frac{1}{\tilde{n}_1} \sin \varphi_1 = \frac{1}{(n_1 - ik_1)} \sin \left( \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} - \frac{2i\pi d_1 k_1}{\lambda} \right), \\ m_{21} &= \tilde{n}_1 \sin \varphi_1 = (n_1 - ik_1) \sin \left( \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} - \frac{2i\pi d_1 k_1}{\lambda} \right). \end{aligned} \quad (2.26)$$

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

$$\begin{aligned}
m_{11} = m_{22} &= \cos \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \operatorname{ch} \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \cdot \frac{k_1}{n_1} + i \sin \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \operatorname{sh} \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \cdot \frac{k_1}{n_1}, \\
m_{12} &= \\
&= \frac{1}{n_1^2 + k_1^2} \left[ \begin{aligned} &\left( n_1 \sin \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \operatorname{ch} \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \cdot \frac{k_1}{n_1} + k_1 \cos \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \operatorname{sh} \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \cdot \frac{k_1}{n_1} \right) - \\ &-i \left( n_1 \cos \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \operatorname{sh} \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \cdot \frac{k_1}{n_1} - k_1 \sin \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \operatorname{ch} \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \cdot \frac{k_1}{n_1} \right) \end{aligned} \right], \\
m_{21} &= n_1 \sin \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \operatorname{ch} \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \cdot \frac{k_1}{n_1} - k_1 \cos \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \operatorname{sh} \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \cdot \frac{k_1}{n_1} - \\
&-i \left( n_1 \cos \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \operatorname{sh} \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \cdot \frac{k_1}{n_1} + k_1 \sin \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \operatorname{ch} \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \cdot \frac{k_1}{n_1} \right). \tag{2.26}
\end{aligned}$$

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

$$\begin{cases} r = \frac{(n_0 - n_m)m_{11} + i(n_0 n_m m_{12} - m_{21})}{(n_0 + n_m)m_{11} + i(n_0 n_m m_{12} + m_{21})}, \\ t = \frac{2n_0}{(n_0 + n_m)m_{11} + i(n_0 n_m m_{12} + m_{21})}. \end{cases} \tag{2.27}$$

Энергетические коэффициенты отражения, пропускания и поглощения:

$$\begin{cases} R = |r|^2, \\ T = \frac{n_m}{n_0} |t|^2, \\ A = 1 - R - T. \end{cases} \tag{2.28}$$

Анализ выражений для энергетических коэффициентов отражения, пропускания и поглощения слоя при наличии в нём поглощения в общем виде, ввиду громоздкости выражений (2.26), (2.27) и (2.28), представляет значительные сложности. Рассмотрим слои, которые имеют предельные значения коэффициента поглощения.

Вначале рассмотрим случай, когда коэффициент поглощения слоя относительно велик, т.е. когда величина  $k_1 \gg 1$ . В этом случае энергетический коэффициент отражения равен коэффициенту отражения передней границы раздела (2.24). 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. В этой плёнке никаких интерференционных эффектов не наблюдается, поскольку всё определяется экспоненциальным множителем в (2.26). 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:

$$\begin{cases} R = \frac{(n_0 - n_1)^2 + k_1^2}{(n_0 + n_1)^2 + k_1^2}, \\ A = \frac{4n_0 n_1}{(n_0 + n_1)^2 + k_1^2}. \end{cases} \quad (2.29)$$

Очевидно, что если излучение падает со стороны оптического элемента, изготовленного из материала с показателем  $n_m$ , то

$$\begin{cases} R' = \frac{(n_m - n_1)^2 + k_1^2}{(n_m + n_1)^2 + k_1^2}, \\ A' = \frac{4n_0 n_1}{(n_m + n_1)^2 + k_1^2}. \end{cases} \quad (2.30)$$

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, когда толщина плёнки достаточно мала, т.е.  $\varphi_1 = 2\pi d_1 n_1 \lambda^{-1} \ll 1$ , элементы матрицы интерференции, характеризующие такой слой, имеют вид:

$$\begin{cases} m_{11} = m_{22} \approx 1, \\ m_{12} = \varphi_1 / n_1, \\ m_{21} = n_1 \varphi_1 \left[ 1 - (k_1 / n_1)^2 + 2i(k_1 / n_1) \right]. \end{cases} \quad (2.31)$$

Здесь, при определении значений элементов матрицы интерференции, члены второго порядка малости по величине  $\varphi_1$  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:

$$\begin{cases} r = \frac{n_1(n_0 - n_m - 2k_1 \varphi_1) + (n_0 n_m - n_1^2 + k_1^2) \varphi_1}{n_1(n_0 + n_m + 2k_1 \varphi_1) + (n_0 n_m + n_1^2 - k_1^2) \varphi_1}, \\ r' = \frac{n_1(n_m - n_0 - 2k_1 \varphi_1) + (n_0 n_m - n_1^2 + k_1^2) \varphi_1}{n_1(n_m + n_0 + 2k_1 \varphi_1) + (n_0 n_m + n_1^2 - k_1^2) \varphi_1}. \end{cases} \quad (2.32)$$

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

$$\begin{cases} \varphi_1 = 2\pi n_1 d_1 \lambda^{-1} = n_m - n_0, \\ n_0 n_m = n_1^2 - k_1^2. \end{cases} \quad (2.33)$$

Для металлов с большим коэффициентом отражения (серебро, алюминий, золото, медь) второе условие никогда не выполняется. Для умеренно отражающих металлов (хром, титан) это условие может быть выполнено. Тогда при толщине плёнки  $d_1 = \lambda(n_m - n_0)/2\pi n_1$  коэффициент отражения при падении излучения со стороны оптического элемента обращается в нуль (рис. 2.7).

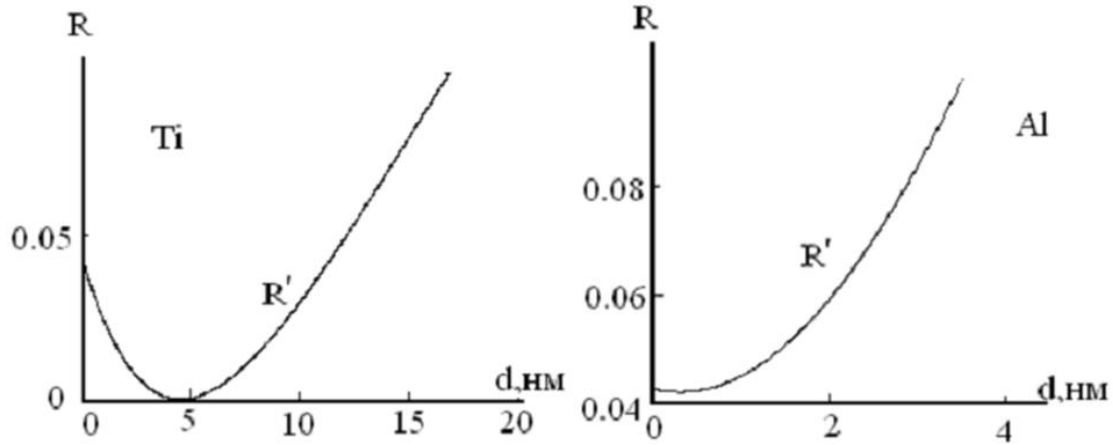


Рисунок 2.7 — Зависимости энергетических коэффициентов отражения для слоёв, изготовленных из титана ( $n_1=2.26$ ,  $k_1=1.77$ ,  $\lambda=550\text{нм}$ ) и алюминия ( $n_1=0.14$ ,  $k_1=2.35$ ,  $\lambda=220\text{нм}$ ), от толщины слоя при падении излучения со стороны оптического элемента на фиксированной длине волны

Энергетические коэффициенты отражения, пропускания и поглощения тонкой плёнки, изготовленной из материала, имеющего поглощение, при падении света со стороны среды с показателем преломления  $n_0$  и со стороны подложки  $n_m$  могут быть определены из следующих соотношений:

$$\left\{ \begin{array}{l} R = \frac{(n_0 - n_m - 2k_1\varphi_1)^2 n_1^2 + (n_0 n_m - n_1^2 + k_1^2) \varphi_1^2}{(n_0 + n_m + 2k_1\varphi_1) n_1^2 + (n_0 n_m + n_1^2 - k_1^2) \varphi_1^2}, \\ R' = \frac{(n_m - n_0 - 2k_1\varphi_1)^2 n_1^2 + (n_0 n_m - n_1^2 + k_1^2) \varphi_1^2}{(n_0 + n_m + 2k_1\varphi_1) n_1^2 + (n_0 n_m + n_1^2 - k_1^2) \varphi_1^2}, \\ T = T' = \frac{4n_0 n_m n_1^2}{(n_0 + n_m + 2k_1\varphi_1) n_1^2 + (n_0 n_m + n_1^2 - k_1^2) \varphi_1^2}, \\ A = \frac{4k_1^2 (2n_0 + k_1\varphi_1) n_1^2 \varphi_1}{(n_0 + n_m + 2k_1\varphi_1) n_1^2 + (n_0 n_m + n_1^2 - k_1^2) \varphi_1^2}, \\ A' = \frac{4k_1^2 (2n_m + k_1\varphi_1) n_1^2 \varphi_1}{(n_0 + n_m + 2k_1\varphi_1) n_1^2 + (n_0 n_m + n_1^2 - k_1^2) \varphi_1^2}; \end{array} \right. \quad (2.34)$$

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

зависимости энергетических коэффициентов отражения, пропускания и поглощения для слоёв, изготовленных из алюминия ( $n_1=1.55$ ,  $k_1=7.00$ ,  $\lambda=700\text{нм}$ ) и хрома ( $n_1=2.04$ ,  $k_1=2.85$ ,  $\lambda=436\text{нм}$ ) от толщины слоя представлены на рис. 2.8.

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

$$R - R' = \frac{4k_1\varphi_1(n_m - n_0)n_1^2}{(n_0 + n_m + 2k_1\varphi_1)n_1^2 + (n_0n_m + n_1^2 - k_1^2)\varphi_1} > 0,$$

т.е.  $R > R'$ , а отношение  $A/A'$  есть:

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

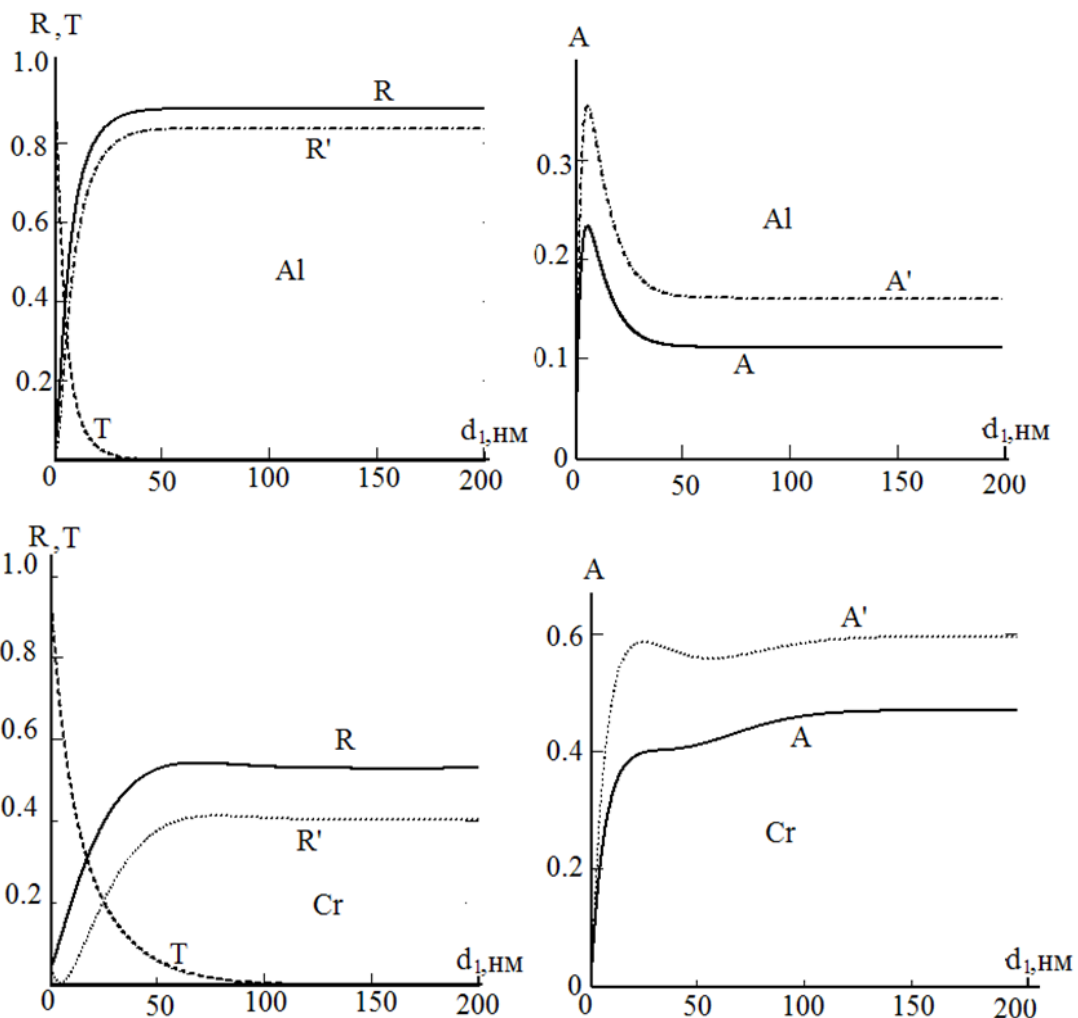


Рисунок 2.8 — Зависимости энергетических коэффициентов отражения, пропускания и поглощения для слоёв, изготовленных из алюминия ( $n_1=1.55$ ,  $k_1=7.00$ ,  $\lambda=700\text{нм}$ ) и хрома ( $n_1=2.04$ ,  $k_1=2.85$ ,  $\lambda=436\text{нм}$ ) в зависимости от толщины слоя

Отношение энергетических коэффициентов поглощения при падении излучения из сред с показателем преломления  $n_m$  и  $n_0$ , приблизительно равны величине  $n_m/n_0$ .

Расчёт энергетических коэффициентов отражения, поглощения и пропускания поглощающих плёнок в зависимости от толщины при наклонном

падании излучения можно производить по формулам (2.26) – (2.28), если в них заменить показатель преломления и фазовую толщину слоёв на эффективные показатели преломления и эффективную фазовую толщину:

$$\tilde{n}_{1эфф} = \begin{cases} \tilde{n}_1 \cos \tilde{\alpha}_1 \\ \cos \tilde{\alpha}_1 \tilde{n}_1^{-1} \end{cases}, \quad \tilde{\varphi}_{1эфф} = \frac{2\pi \tilde{n}_1 d_1 \cos \tilde{\alpha}_1}{\lambda},$$

где  $\tilde{\alpha}_1$ , так же как и раньше определяется из закона Снеллиуса.

**2.4 Определение спектральных характеристик энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Схема распространения излучения представлена на рис. 2.9**

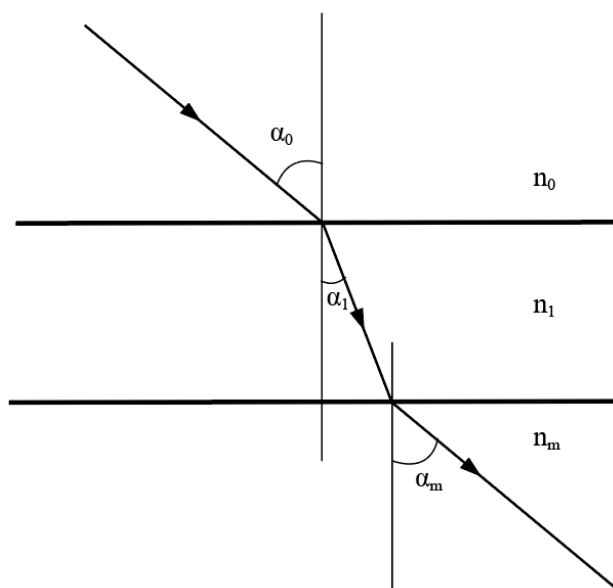


Рисунок 2.9 — Иллюстрация к задаче 2.4

**Задача 2.4.1.** Необходимо определить спектральную характеристику энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления 1,35, его оптическая толщина равна  $0.25\lambda_0$ , излучение падает по нормали в диапазоне длин волн  $(0,5-1,5)\lambda_0$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1,5$ . Сравнить эту характеристику со спектральной характеристикой границы стекло-воздух.

**Задача 2.4.2.** Необходимо определить спектральную характеристику энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления 1,45, его оптическая толщина равна  $0.25\lambda_0$ , излучение падает по нормали в диапазоне длин волн  $(0,5-1,5)\lambda_0$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,

$n_m=1,7$ . Сравнить эту характеристику со спектральной характеристикой границы стекло-воздух.

**Задача 2.4.3.** Необходимо определить спектральную характеристику энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления 1,75, его оптическая толщина равна  $0.25\lambda_0$ , излучение падает по нормали в диапазоне длин волн  $(0,5-1,5)\lambda_0$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1,45$ . Сравнить эту характеристику со спектральной характеристикой границы стекло-воздух.

**Задача 2.4.4.** Необходимо определить спектральную характеристику энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления 1,95, его оптическая толщина равна  $0.25\lambda_0$ , излучение падает по нормали в диапазоне длин волн  $(0,5-1,5)\lambda_0$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1,52$ . Сравнить эту характеристику со спектральной характеристикой границы стекло-воздух.

**Задача 2.4.5.** Необходимо определить спектральную характеристику энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления 1,38, его оптическая толщина равна  $0.25\lambda_0$ , излучение падает по нормали в диапазоне длин волн  $(0,5-1,5)\lambda_0$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.72$ . Сравнить эту характеристику со спектральной характеристикой границы стекло-воздух.

**Задача 2.4.6.** Необходимо определить спектральную характеристику энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления 1,35, его оптическая толщина равна  $0.25\lambda_0$ , излучение падает по нормали в диапазоне длин волн  $(0,5-1,5)\lambda_0$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1,5$ . Сравнить эту характеристику со спектральной характеристикой границы стекло-воздух.

**Задача 2.4.7.** Необходимо определить спектральную характеристику энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления 1,65, его оптическая толщина равна  $0.25\lambda_0$ , излучение падает по нормали в диапазоне длин волн  $(0,5-1,5)\lambda_0$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,

$n_m=1.52$ . Сравнить эту характеристику со спектральной характеристикой границы стекло - воздух.

**Задача 2.4.8.** Необходимо определить спектральную характеристику энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления 1,75, его оптическая толщина равна  $0.25\lambda_0$ , излучение падает по нормали в диапазоне длин волн  $(0,5-1,5)\lambda_0$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1,45$ . Сравнить эту характеристику со спектральной характеристикой границы стекло-воздух.

**Задача 2.4.9.** Необходимо определить спектральную характеристику энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления 1,35, его оптическая толщина равна  $0.125\lambda_0$ , излучение падает по нормали в диапазоне длин волн  $(0,5-1,5)\lambda_0$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1,5$ . Сравнить эту характеристику со спектральной характеристикой границы стекло-воздух.

**Задача 2.4.10.** Необходимо определить спектральную характеристику энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления 1,35, его оптическая толщина равна  $0.20\lambda_0$ , излучение падает по нормали в диапазоне длин волн  $(0,5-1,5)\lambda_0$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1,5$ . Сравнить эту характеристику со спектральной характеристикой границы стекло-воздух.

**Задача 2.4.11.** Необходимо определить спектральную характеристику энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления 1,35, его оптическая толщина равна  $0.025\lambda_0$ , излучение падает по нормали в диапазоне длин волн  $(0,5-1,5)\lambda_0$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1,5$ . Сравнить эту характеристику со спектральной характеристикой границы стекло-воздух.

**Задача 2.4.12.** Необходимо определить спектральную характеристику энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления 1,35, его оптическая толщина равна  $0.35\lambda_0$ , излучение падает по нормали в диапазоне длин волн  $(0,5-1,5)\lambda_0$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,



$n_m=1.5$ . Сравнить эту характеристику со спектральной характеристикой границы стекло-воздух.

### Пример решения задачи данного вида

В условиях задачи заданы следующие величины:  $n_0=1.0$ ,  $n_m=1.54$ , параметры слоя – оптическая толщина  $n_1 d_1=0.22 \lambda_0$  и показатель преломления материала, из которого изготовлен слой -  $n_1=1.98$ , излучение падает по нормали, диапазон длин волн  $\lambda=(0.5-1.5)\lambda_0$ .

Решение задачи следует начать с определения фазовой толщины слоя, которая может быть определена согласно выражению:

$$\varphi_1 = 2\pi n_1 d_1 (\lambda)^{-1},$$

для рассматриваемого случая,

$$\varphi_1 = 2\pi \cdot 0.22 \lambda_0 [(0.5 \div 1.5)\lambda_0]^{-1} = 0.44\pi [(0.5 \div 1.5)]^{-1},$$

т.е. фазовая толщина будет различной для разных длин волн.

Далее необходимо написать согласно (2.1) выражение для определения амплитудного коэффициента отражения рассматриваемой системы:

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

где согласно (2.2)

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

поскольку все матричные элементы зависят от  $\varphi_1$ , то, следовательно, они зависят от длины волны, и амплитудный коэффициент отражения также будет зависеть от длины волны падающего излучения:

$$r(\lambda) = \frac{(n_0 \cos \varphi_1(\lambda) - n_m \cos \varphi_1(\lambda)) + i(n_0 n_m n_1^{-1} \sin \varphi_1(\lambda) - n_1 \sin \varphi_1(\lambda))}{(n_0 \cos \varphi_1(\lambda) + n_m \cos \varphi_1(\lambda)) + i(n_0 n_m n_1^{-1} \sin \varphi_1(\lambda) + n_1 \sin \varphi_1(\lambda))}.$$

Спектральная характеристика данного покрытия может быть определена из выражения:

$$R(\lambda) = |r(\lambda)|^2.$$

Для рассматриваемого случая спектральная характеристика энергетического коэффициента отражения однослойного непоглощающего покрытия представлена на рис. 2.10.

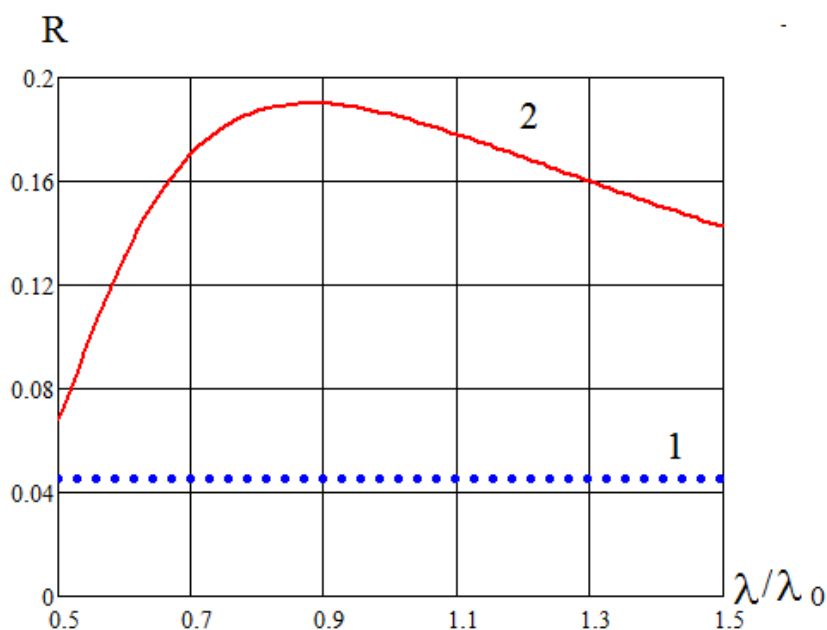


Рисунок 2.10 — Спектральная характеристика коэффициента отражения. 1 - коэффициент отражения стекла без покрытия, 2 - при наличии на поверхности стекла однослойного непоглощающего покрытия

## 2.5 Определение зависимости энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение (рис. 2.9)

**Задача 2.5.1.** Необходимо определить распределение энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой может быть сформирован из материалов, показатели преломления которых находятся в интервале (1.35-2.0). Его оптическая толщина равна  $0.25\lambda_0$ , излучение падает по нормали на длине волны  $\lambda_0$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1,5$ . Сравнить эту характеристику со спектральной характеристикой границы стекло-воздух.

**Задача 2.5.2.** Необходимо определить распределение энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой может быть сформирован из материалов с показателем преломления, находящимся в интервале (1.35-2.0), его оптическая толщина равна  $0.25\lambda_0$ , излучение падает по нормали на длине волны  $\lambda_0$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=2.5$ . Сравнить эту характеристику со спектральной характеристикой границы стекло-воздух.

**Задача 2.5.3.** Необходимо определить распределение энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой может быть сформирован из материалов с показателем преломления,

находящимся в интервале (1.35-2.0), его оптическая толщина равна  $0.25\lambda_0$ , излучение падает по нормали на длине волны  $\lambda_0$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=2.0$ . Сравнить эту характеристику со спектральной характеристикой границы стекло-воздух.

**Задача 2.5.4.** Необходимо определить распределение энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой может быть сформирован из материалов с показателем преломления, находящимся в интервале (2.0-3.0), его оптическая толщина равна  $0.25\lambda_0$ , излучение падает по нормали на длине волны  $\lambda_0$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.5$ . Сравнить эту характеристику со спектральной характеристикой границы стекло-воздух.

**Задача 2.5.5.** Необходимо определить распределение энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой может быть сформирован из материалов с показателем преломления, находящимся в интервале (1.35-2.25), его оптическая толщина равна  $0.25\lambda_0$ , излучение падает по нормали на длине волны  $\lambda_0$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=2.25$ . Сравнить эту характеристику со спектральной характеристикой границы стекло-воздух.

**Задача 2.5.6.** Необходимо определить распределение энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой может быть сформирован из материалов с показателем преломления, находящимся в интервале (1.45-2.70), его оптическая толщина равна  $0.25\lambda_0$ , излучение падает по нормали на длине волны  $\lambda_0$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=2.1$ . Сравнить эту характеристику со спектральной характеристикой границы стекло-воздух.

**Задача 2.5.7.** Необходимо определить распределение энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой может быть сформирован из материалов с показателем преломления, находящимся в интервале (2.35-4.0), его оптическая толщина равна  $0.25\lambda_0$ , излучение падает по нормали на длине волны  $\lambda_0$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=2.5$ . Сравнить эту характеристику со спектральной характеристикой границы стекло-воздух.

**Задача 2.5.8.** Необходимо определить распределение энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой может быть сформирован из материалов с показателем преломления,

находящимся в интервале (2.0-4.0), его оптическая толщина равна  $0.25\lambda_0$ , излучение падает по нормали на длине волны  $\lambda_0$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=2.0$ . Сравнить эту характеристику со спектральной характеристикой границы стекло-воздух.

**Задача 2.5.9.** Необходимо определить распределение энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой может быть сформирован из материалов с показателем преломления, находящимся в интервале (1.35-2.40), его оптическая толщина равна  $0.25\lambda_0$ , излучение падает по нормали на длине волны  $\lambda_0$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1.3$ ,  $n_m=1.6$ . Сравнить эту характеристику со спектральной характеристикой границы стекло-воздух.

**Задача 2.5.10.** Необходимо определить распределение энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой может быть сформирован из материалов с показателем преломления, находящимся в интервале (1.35-2.5), его оптическая толщина равна  $0.25\lambda_0$ , излучение падает по нормали на длине волны  $\lambda_0$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1.3$ ,  $n_m=2.2$ . Сравнить эту характеристику со спектральной характеристикой границы стекло-воздух.

**Задача 2.5.11.** Необходимо определить распределение энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой может быть сформирован из материалов с показателем преломления, находящимся в интервале (1.45-3.0), его оптическая толщина равна  $0.25\lambda_0$ , излучение падает по нормали на длине волны  $\lambda_0$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1.3$ ,  $n_m=2.4$ . Сравнить эту характеристику со спектральной характеристикой границы стекло-воздух.

**Задача 2.5.12.** Необходимо определить распределение энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой может быть сформирован из материалов с показателем преломления, находящимся в интервале (1.45-2.80), его оптическая толщина равна  $0.25\lambda_0$ , излучение падает по нормали на длине волны  $\lambda_0$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1.3$ ,  $n_m=2.5$ . Сравнить эту характеристику со спектральной характеристикой границы стекло-воздух.

### **Пример решения задачи данного вида**

В условиях задачи заданы следующие величины:  $n_0=1.30$ ,  $n_m=1.62$ , параметры слоя – оптическая толщина  $n_1d_1 = 0.25 \lambda_0$  и показатель преломления

материала, из которого изготовлен слой, лежит в интервале  $1.35 < n_1 < 3.0$ , излучение падает по нормали на длине волны, диапазон длин волн  $\lambda = \lambda_0$ .

Решение задачи следует начать с определения фазовой толщины слоя, которая может быть определена согласно выражению:

$$\varphi_1 = 2\pi n_1 d_1 (\lambda)^{-1},$$

для рассматриваемого случая

$$\varphi_1 = 2\pi \cdot 0.25 \lambda_0 (\lambda_0)^{-1} = 0.5\pi,$$

т.е. фазовая толщина будет постоянной на данной длине волны для материалов покрытия, имеющих разные показатели преломления.

Далее необходимо написать согласно (2.1) выражение для определения амплитудного коэффициента отражения рассматриваемой системы:

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

где согласно (2.2)

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

поскольку матричные элементы  $m_{12}$  и  $m_{21}$  зависят от  $n_1$ , то, следовательно, и амплитудный коэффициент отражения также будет зависеть от величины показателя преломления материала, из которого изготовлен слой:

$$r(n_1) = \frac{(n_0 \cos \varphi_1 - n_m \cos \varphi_1) + i(n_0 n_m n_1^{-1} \sin \varphi_1 - n_1 \sin \varphi_1)}{(n_0 \cos \varphi_1 + n_m \cos \varphi_1) + i(n_0 n_m n_1^{-1} \sin \varphi_1 + n_1 \sin \varphi_1)}.$$

Зависимость энергетического коэффициента отражения от показателя преломления материала, из которого изготовлен слой, определяется из следующего соотношения:

$$R(n_1) = |r(n_1)|^2.$$

Для рассматриваемого случая зависимость энергетического коэффициента отражения от показателя преломления материала, из которого изготовлен слой, представлена на рис. 2.11.

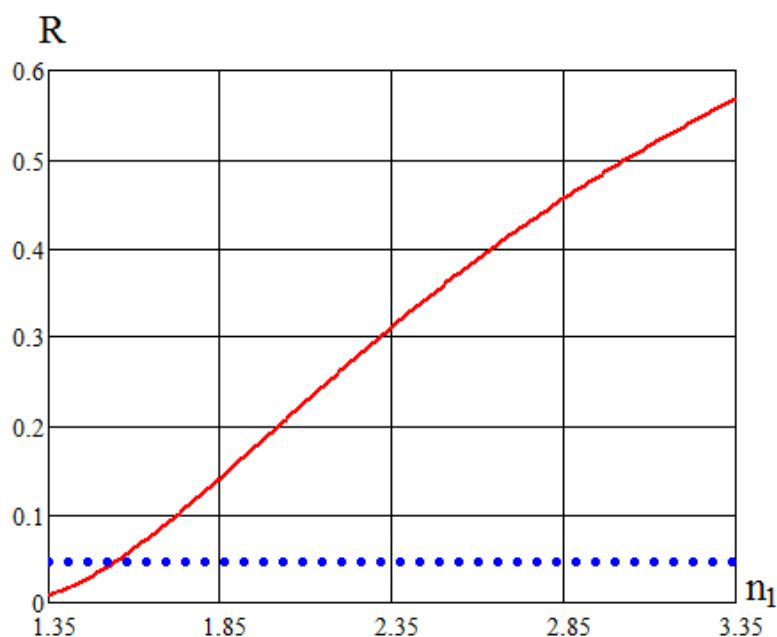


Рисунок 2.11 — Зависимость энергетического коэффициента отражения от показателя преломления материала, из которого изготовлен слой. 1- стекла без покрытия, 2- на поверхности стекла находится однослойное покрытие, изготовленное из непоглощающего покрытия. Излучение падает по нормали на длине волны  $\lambda=\lambda_0$

## 2.6 Определение спектральных характеристик энергетического коэффициента отражения $s$ - и $p$ - компонент для случая, когда на поверхности оптического элемента присутствует слой из материала, у которого отсутствует поглощение, Схема распространения излучения представлена на рис. 2.9

**Задача 2.6.1.** Необходимо определить распределение по углам энергетического коэффициента отражения  $s$ - и  $p$ - компонент для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления 1.35, его оптическая толщина равна  $0.25\lambda_0$ , излучение падает на длине волны  $\lambda_0$ , угол падения излучения лежит в диапазоне  $0 < \alpha_0 \leq \pi/2$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.5$ . Сравнить эту характеристику со спектральной характеристикой границы стекло-воздух.

**Задача 2.6.2.** Необходимо определить распределение по углам энергетического коэффициента отражения  $s$ - и  $p$ - компонент для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления 1.45, его оптическая толщина равна  $0.25\lambda_0$ , излучение падает на длине волны  $\lambda_0$ , угол падения излучения лежит в диапазоне  $0 < \alpha_0 \leq \pi/2$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.7$ . Сравнить эту характеристику со спектральной характеристикой границы стекло-воздух.

**Задача 2.6.3.** Необходимо определить распределение по углам энергетического коэффициента отражения  $s$ - и  $p$ - компонент для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления 1.75, его оптическая толщина равна  $0.25\lambda_0$ , излучение падает на длине волны  $\lambda_0$ , угол падения излучения лежит в диапазоне  $0 < \alpha_0 \leq \pi/2$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.45$ . Сравнить эту характеристику со спектральной характеристикой границы стекло-воздух.

**Задача 2.6.4.** Необходимо определить распределение по углам энергетического коэффициента отражения  $s$ - и  $p$ - компонент для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления 1.95, его оптическая толщина равна  $0.25\lambda_0$ , излучение падает на длине волны  $\lambda_0$ , угол падения излучения лежит в диапазоне  $0 < \alpha_0 \leq \pi/2$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.52$ . Сравнить эту характеристику со спектральной характеристикой границы стекло-воздух.

**Задача 2.6.5.** Необходимо определить распределение по углам энергетического коэффициента отражения  $s$ - и  $p$ - компонент для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления 1.38, его оптическая толщина равна  $0.25\lambda_0$ , излучение на длине волны  $\lambda_0$ , угол падения излучения лежит в диапазоне  $0 < \alpha_0 \leq \pi/2$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.72$ . Сравнить эту характеристику со спектральной характеристикой границы стекло-воздух.

**Задача 2.6.6.** Необходимо определить распределение по углам энергетического коэффициента отражения  $s$ - и  $p$ - компонент для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления 1.35, его оптическая толщина равна  $0.25\lambda_0$ , излучение падает на длине волны  $\lambda_0$ , угол падения излучения лежит в диапазоне  $0 < \alpha_0 \leq \pi/2$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1,5$ . Сравнить эту характеристику со спектральной характеристикой границы стекло-воздух.

**Задача 2.6.7.** Необходимо определить распределение по углам энергетического коэффициента отражения  $s$ - и  $p$ - компонент для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления 1.65, его оптическая толщина равна  $0.25\lambda_0$ , излучение падает на длине волны  $\lambda_0$ , угол падения излучения лежит в диапазоне  $0 < \alpha_0 \leq \pi/2$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.52$ . Сравнить эту характеристику со спектральной характеристикой границы стекло-воздух.

**Задача 2.6.8.** Необходимо определить распределение по углам энергетического коэффициента отражения  $s$ - и  $p$ - компонент для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления 1.75, его оптическая толщина равна  $0.25\lambda_0$ , излучение падает на длине волны  $\lambda_0$ , угол падения излучения лежит в диапазоне  $0 < \alpha_0 \leq \pi/2$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.45$ . Сравнить эту характеристику со спектральной характеристикой границы стекло-воздух.

**Задача 2.6.9.** Необходимо определить распределение по углам энергетического коэффициента отражения  $s$ - и  $p$ - компонент для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления 1.35, его оптическая толщина равна  $0.125\lambda_0$ , излучение падает на длине волны  $\lambda_0$ , угол падения излучения лежит в диапазоне  $0 < \alpha_0 \leq \pi/2$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.5$ . Сравнить эту характеристику со спектральной характеристикой границы стекло-воздух.

**Задача 2.6.10.** Необходимо определить распределение по углам энергетического коэффициента отражения  $s$ - и  $p$ - компонент для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления 1.35, его оптическая толщина равна  $0.20\lambda_0$ , излучение падает на длине волны  $\lambda_0$ , угол падения излучения лежит в диапазоне  $0 < \alpha_0 \leq \pi/2$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.5$ . Сравнить эту характеристику со спектральной характеристикой границы стекло-воздух.

**Задача 2.6.11.** Необходимо определить распределение по углам энергетического коэффициента отражения  $s$ - и  $p$ - компонент для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления 1.35, его оптическая толщина равна  $0.025\lambda_0$ , излучение падает на длине волны  $\lambda_0$ , угол падения излучения лежит в диапазоне  $0 < \alpha_0 \leq \pi/2$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.5$ . Сравнить эту характеристику со спектральной характеристикой границы стекло-воздух.

**Задача 2.6.12.** Необходимо определить распределение по углам энергетического коэффициента отражения  $s$ - и  $p$ - компонент для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления 1.35, его оптическая толщина равна  $0.35\lambda_0$ , излучение падает на длине волны  $\lambda_0$ , угол падения излучения лежит в диапазоне  $0 < \alpha_0 \leq \pi/2$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.5$ . Сравнить эту характеристику со спектральной характеристикой границы стекло-воздух.



## Пример решения задачи данного вида

В условиях задачи заданы следующие величины:  $n_0=1.30$ ,  $n_m=1.65$ , параметры слоя – слой сформирован из материала с показателем преломления 2.0, оптическая толщина  $n_1 d_1 = 0.23 \lambda_0$ , излучение падает на длине волны  $\lambda_0$ , угол падения излучения лежит в диапазоне  $0 < \alpha \leq \pi/2$ .

Решение задачи следует начать с определения фазовой толщины слоя, которая может быть определена согласно выражению (2.21):

$$\varphi_1 = 2\pi n_1 d_1 (\lambda)^{-1} \cos \alpha_1$$

для рассматриваемого случая

$$\tilde{\varphi}_1 = 2\pi \cdot 0.25 \lambda_0 (\lambda_0)^{-1} = 0.5\pi \cos \alpha_1,$$

т.е. фазовая толщина будет зависеть от угла падения излучения и от длины волны падающего излучения.

Далее следует определить показатели преломления материала, из которого изготовлен слой, и материалов, его обрамляющих, для  $p$ - и  $s$ - компонент.

Согласно (2.22)

$$\tilde{n}_i = \begin{cases} n_i \cos \alpha_i & s \text{ – поляризация} \\ n_i^{-1} \cos \alpha_i & p \text{ – поляризация,} \end{cases}$$

Следовательно

$$\tilde{n}_0 = \begin{cases} n_0 \cos \alpha_0 & s \text{ – поляризация} \\ n_0^{-1} \cos \alpha_0 & p \text{ – поляризация,} \end{cases}$$

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

$$\tilde{n}_m = \begin{cases} n_m \cos \alpha_m & s \text{ – поляризация} \\ n_m^{-1} \cos \alpha_m & p \text{ – поляризация.} \end{cases}$$

Значения углов можно найти из закона Снеллиуса.

Согласно (2.22a), амплитудные коэффициенты отражения для  $p$ - и  $s$ - компонент могут быть определены из следующих соотношений

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

$$R(\alpha_0) = |r(\alpha_0)|^2.$$

Для рассматриваемого случая распределение энергетического коэффициента отражения  $s$ - и  $p$ - компонент от угла падения излучения для случая, когда на поверхности оптического элемента сформирован слой из материала, у которого отсутствует поглощение на длине волн  $\lambda=\lambda_0$ , представлено на рис.2.12.

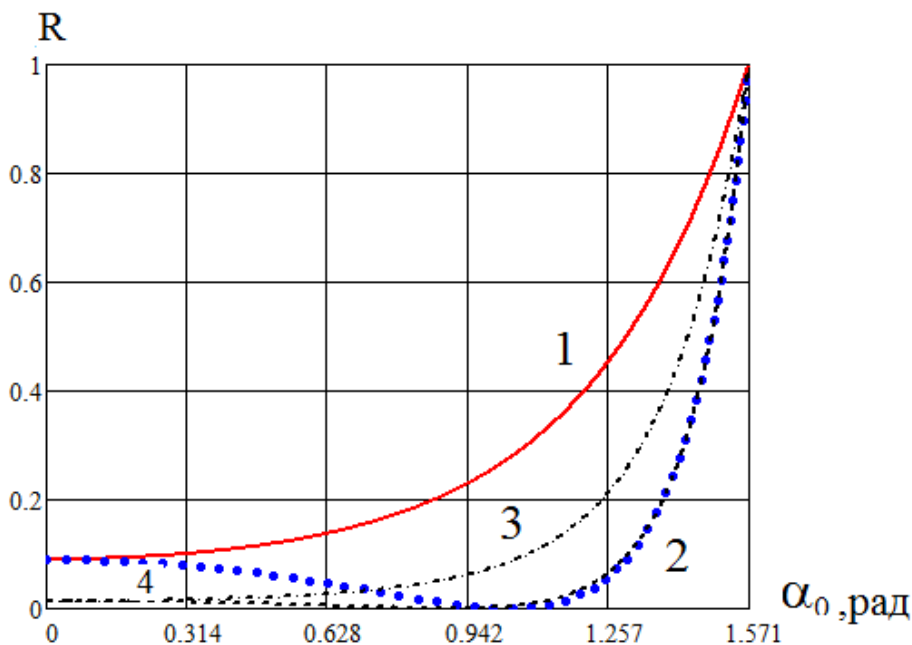


Рисунок 2.12 — Распределение по углам энергетического коэффициента отражения  $s$ - и  $p$ - компонент для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Параметры слоя – слой сформирован из материала с показателем преломления 2.0, оптическая толщина  $n_1 d_1 = 0.23 \lambda_0$ , излучение падает на длине волн  $\lambda_0$ ,  $n_0=1.30$ ,  $n_m=1.65$ , 1- $R^s$ , 2-  $R^p$ - коэффициенты отражения для  $p$ -  $s$ - компонент от слоя, 3- $R^s$ , 4-  $R^p$ - коэффициенты отражения для  $p$ -  $s$ - компонент от поверхности материала с коэффициентом преломления 1.65

## 2.7 Определение распределения фазы отражённого излучения по длинам волн для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого поглощение отсутствует. Схема распространения излучения представлена на рис. 2.9

**Задача 2.7.1.** Необходимо определить распределение фазы отражённого излучения по длинам волн для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления 1.35, его оптическая толщина равна  $0.25\lambda_0$ , излучение падает по нормали в диапазоне длин волн  $(0.5-1.5)\lambda_0$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.5$ .

**Задача 2.7.2.** Необходимо определить распределение фазы отражённого излучения по длинам волн для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой

сформирован из материала с показателем преломления 1.45, его оптическая толщина равна  $0.25\lambda_0$ , излучение падает по нормали в диапазоне длин волн  $(0.5-1.5)\lambda_0$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.7$ .

**Задача 2.7.3.** Необходимо определить распределение фазы отражённого излучения по длинам волн для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления 1.75, его оптическая толщина равна  $0.25\lambda_0$ , излучение падает по нормали в диапазоне длин волн  $(0.5-1.5)\lambda_0$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.45$ .

**Задача 2.7.4.** Необходимо определить распределение фазы отражённого излучения по длинам волн для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления 1.95, его оптическая толщина равна  $0.25\lambda_0$ , излучение падает по нормали в диапазоне длин волн  $(0.5-1.5)\lambda_0$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.52$ .

**Задача 2.7.5.** Необходимо определить распределение фазы отражённого излучения по длинам волн для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления 1.38, его оптическая толщина равна  $0.25\lambda_0$ , излучение падает по нормали в диапазоне длин волн  $(0.5-1.5)\lambda_0$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.72$ .

**Задача 2.7.6.** Необходимо определить распределение фазы отражённого излучения по длинам волн для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления 1.35, его оптическая толщина равна  $0.25\lambda_0$ , излучение падает по нормали в диапазоне длин волн  $(0.5-1.5)\lambda_0$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.5$ .

**Задача 2.7.7.** Необходимо определить распределение фазы отражённого излучения по длинам волн для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления 1.65, его оптическая толщина равна  $0.25\lambda_0$ , излучение падает по нормали в диапазоне длин волн  $(0.5-1.5)\lambda_0$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.52$ .

**Задача 2.7.8.** Необходимо определить распределение фазы отражённого излучения по длинам волн для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления 1.75, его оптическая толщина равна  $0.25\lambda_0$ , излучение падает по нормали в диапазоне длин волн  $(0.5-1.5)\lambda_0$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.45$ .

**Задача 2.7.9.** Необходимо определить распределение фазы отражённого излучения по длинам волн для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления 1.35, его оптическая толщина равна  $0.125\lambda_0$ , излучение падает по нормали в диапазоне длин волн  $(0.5-1.5)\lambda_0$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1, n_m=1.5$ .

**Задача 2.7.10.** Необходимо определить распределение фазы отражённого излучения по длинам волн для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления 1.35, его оптическая толщина равна  $0.20\lambda_0$ , излучение падает по нормали в диапазоне длин волн  $(0.5-1.5)\lambda_0$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1, n_m=1.5$ .

**Задача 2.7.11.** Необходимо определить распределение фазы отражённого излучения по длинам волн для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления 1.35, его оптическая толщина равна  $0.025\lambda_0$ , излучение падает по нормали в диапазоне длин волн  $(0.5-1.5)\lambda_0$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1, n_m=1.5$ .

**Задача 2.7.12.** Необходимо определить распределение фазы отражённого излучения для р- и s компонент в зависимости от угла падения излучения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления 1.35, его оптическая толщина равна  $0.35\lambda_0$ , излучение падает по нормали в диапазоне длин волн  $(0.5-1.5)\lambda_0$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1, n_m=1.5$ .

### Пример решения задачи данного вида

В условиях задачи заданы следующие величины:  $n_0=1.30, n_m=1.65$ , параметры слоя – слой сформирован из материала с показателем преломления 2.0, оптическая толщина  $n_1d_1 = 0.23 \lambda_0$ , излучение падает под углом  $30^\circ$ , диапазон падающих длин волн  $(0.5-1.5)\lambda_0$ .

Решение задачи следует начать с определения фазовой толщины слоя, которая может быть определена согласно выражению (2.21):

$$\varphi_1 = 2\pi n_1 d_1 (\lambda)^{-1} \cos \alpha_1,$$

для рассматриваемого случая

$$\tilde{\varphi}_1(\lambda) = 2\pi \cdot 0.23\lambda_0 (\lambda)^{-1},$$

т.е. фазовая толщина будет зависеть от угла падения излучения и от длины падающего излучения.

Далее следует определить показатели преломления материала, из которого изготовлен слой, и материалов, его обрамляющих, для  $p$ - и  $s$ -компонент.

Согласно (2.22)

$$\tilde{n}_i = \begin{cases} n_i \cos \alpha_i & s \text{ – поляризация} \\ n_i^{-1} \cos \alpha_i & p \text{ – поляризация,} \end{cases}$$

Следовательно

$$\tilde{n}_0 = \begin{cases} n_0 \cos \alpha_0 & s \text{ – поляризация} \\ n_0^{-1} \cos \alpha_0 & p \text{ – поляризация,} \end{cases}$$

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

$$\tilde{n}_m = \begin{cases} n_m \cos \alpha_m & s \text{ – поляризация} \\ n_m^{-1} \cos \alpha_m & p \text{ – поляризация.} \end{cases}$$

Значения углов можно найти из закона Снеллиуса.

Согласно (2.22а), амплитудные коэффициента отражения для  $p$ - и  $s$ -компонент могут быть определены из следующих соотношений:

$$\begin{cases} r^s(\alpha_0, \lambda) = \operatorname{Re}(r^s(\alpha_0, \lambda)) + i \operatorname{Im}(r^s(\alpha_0, \lambda)) = |r^s(\alpha_0, \lambda)| e^{i\rho^s(\alpha_0, \lambda)} \\ r^p(\alpha_0, \lambda) = \operatorname{Re}(r^p(\alpha_0, \lambda)) + i \operatorname{Im}(r^p(\alpha_0, \lambda)) = |r^p(\alpha_0, \lambda)| e^{i\rho^p(\alpha_0, \lambda)} \end{cases},$$

где

$$\rho^s(\alpha_0, \lambda) = \frac{\operatorname{Im}(r^s(\alpha_0, \lambda))}{\operatorname{Re}(r^s(\alpha_0, \lambda))} \quad \rho^p(\alpha_0, \lambda) = \frac{\operatorname{Im}(r^p(\alpha_0, \lambda))}{\operatorname{Re}(r^p(\alpha_0, \lambda))}.$$

Для рассматриваемого случая распределение фазы отражённого излучения по длинам волн для известного угла падения излучения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение, представлено на рис. 2.13.

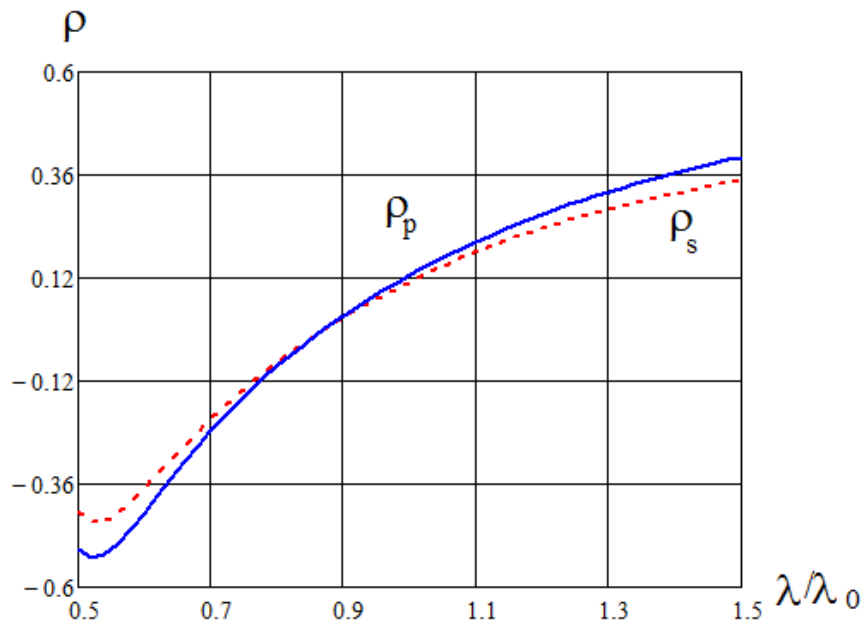


Рисунок 2.13 — Распределение по длинам волн фазы отражённого излучения для  $p$ - и  $s$ -компонент при известном угле падения ( $30^\circ$ ) излучения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение  $n_m=1.65$ . Излучение падает из среды с известным показателем преломления  $n_0=1.30$ , слой сформирован из материала с показателем преломления 2.0, оптическая толщина  $n_1d_1=0.23\lambda_0$ , излучение падает

## 2.8 Определение распределения фазы отражённого излучения в зависимости от угла падения излучения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого поглощение отсутствует. Схема распространения излучения представлена на рис. 2.9

**Задача 2.8.1.** Необходимо определить распределение фазы отражённого излучения  $p$ - и  $s$ -компонент в зависимости от угла падения излучения  $0 < \alpha_0 \leq \pi/2$  для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления 1.35, его оптическая толщина равна  $0.25\lambda_0$ , излучение падает на длине волны  $\lambda = \lambda_0$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.5$ .

**Задача 2.8.2.** Необходимо определить распределение фазы отражённого излучения  $p$ - и  $s$ -компонент в зависимости от угла падения излучения  $0 < \alpha_0 \leq \pi/2$  для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления 1.45, его оптическая толщина равна  $0.25\lambda_0$ , излучение падает на длине волны  $\lambda = \lambda_0$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.7$ .

**Задача 2.8.3.** Необходимо определить распределение фазы отражённого излучения  $p$ - и  $s$ -компонент в зависимости от угла падения излучения

$0 < \alpha_0 \leq \pi/2$ . для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления 1.75, его оптическая толщина равна  $0.25\lambda_0$ , излучение падает на длине волны  $\lambda = \lambda_0$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1, n_m=1.45$ .

**Задача 2.8.4.** Необходимо определить распределение фазы отражённого излучения  $p$ - и  $s$ - компонент в зависимости от угла падения излучения  $0 < \alpha_0 \leq \pi/2$ . для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления 1.95, его оптическая толщина равна  $0.25\lambda_0$ , излучение длин волн  $(0.5-1.5)\lambda_0$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1, n_m=1.52$ .

**Задача 2.8.5.** Необходимо определить распределение фазы отражённого излучения  $p$ - и  $s$ - компонент в зависимости от угла падения излучения  $0 < \alpha_0 \leq \pi/2$ . для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления 1.38, его оптическая толщина равна  $0.25\lambda_0$ , излучение падает на длине волны  $\lambda = \lambda_0$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1, n_m=1.72$ .

**Задача 2.8.6.** Необходимо определить распределение фазы отражённого излучения  $p$ - и  $s$ - компонент в зависимости от угла падения излучения  $0 < \alpha_0 \leq \pi/2$ . для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления 1.35, его оптическая толщина равна  $0.25\lambda_0$ , излучение падает на длине волны  $\lambda = \lambda_0$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1, n_m=1.5$ .

**Задача 2.8.7.** Необходимо определить распределение фазы отражённого излучения  $p$ - и  $s$ - компонент в зависимости от угла падения излучения  $0 < \alpha_0 \leq \pi/2$ . для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления 1.65, его оптическая толщина равна  $0.25\lambda_0$ , излучение падает на длине волны  $\lambda = \lambda_0$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1, n_m=1.52$ .

**Задача 2.8.8.** Необходимо определить распределение фазы отражённого излучения  $p$ - и  $s$ - компонент в зависимости от угла падения излучения  $0 < \alpha_0 \leq \pi/2$ . для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления 1.75, его оптическая толщина равна  $0.25\lambda_0$ , излучение падает на длине волны  $\lambda = \lambda_0$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1, n_m=1.45$ .

**Задача 2.8.9.** Необходимо определить распределение фазы отражённого излучения  $p$ - и  $s$ - компонент в зависимости от угла падения излучения  $0 < \alpha_0 \leq \pi/2$  для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления 1.35, его оптическая толщина равна  $0.125\lambda_0$ , излучение падает на длине волны  $\lambda = \lambda_0$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1, n_m=1.5$ .

**Задача 2.8.10.** Необходимо определить распределение фазы отражённого излучения  $p$ - и  $s$ - компонент в зависимости от угла падения излучения  $0 < \alpha_0 \leq \pi/2$  для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления 1.35, его оптическая толщина равна  $0.20\lambda_0$ , излучение падает на длине волны  $\lambda = \lambda_0$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1, n_m=1.5$ .

**Задача 2.8.11.** Необходимо определить распределение фазы отражённого излучения  $p$ - и  $s$ - компонент в зависимости от угла падения излучения  $0 < \alpha_0 \leq \pi/2$  для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления 1.35, его оптическая толщина равна  $0.025\lambda_0$ , излучение падает на длине волны  $\lambda = \lambda_0$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1, n_m=1.5$ .

**Задача 2.8.12.** Необходимо определить распределение фазы отражённого излучения  $p$ - и  $s$ - компонент в зависимости от угла падения излучения  $0 < \alpha_0 \leq \pi/2$  для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления 1.35, его оптическая толщина равна  $0.35\lambda_0$ , излучение падает на длине волны  $\lambda = \lambda_0$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1, n_m=1.5$ .

### Пример решения задачи данного вида

В условиях задачи заданы следующие величины:  $n_0=1.00, n_m=1.72$ , параметры слоя – слой сформирован из материала с показателем преломления 2.0, оптическая толщина  $n_1d_1=0.27\lambda_0$ , излучение падает на длине волны  $\lambda_0$ , угол падения излучения лежит в диапазоне  $0 < \alpha_0 \leq \pi/2$ .

Решение задачи следует начать с определения фазовой толщины слоя, которая может быть определена согласно выражению (2.21):

$$\varphi_1 = 2\pi n_1 d_1 (\lambda)^{-1} \cos \alpha_1,$$

для рассматриваемого случая

$$\tilde{\varphi}_1 = 2\pi \cdot 0.25\lambda_0 (\lambda_0)^{-1} = 0.5\pi \cos \alpha_1,$$

т.е. фазовая толщина будет зависеть от угла падения излучения.



Далее следует определить показатели преломления материала, из которого изготовлен слой, и материалов, его обрамляющих, для  $p$ - и  $s$ - компонент.

Согласно (2.22)

$$\tilde{n}_i = \begin{cases} n_i \cos \alpha_i & s \text{ – поляризация} \\ n_i^{-1} \cos \alpha_i & p \text{ – поляризация,} \end{cases}$$

Следовательно

$$\tilde{n}_0 = \begin{cases} n_0 \cos \alpha_0 & s \text{ – поляризация} \\ n_0^{-1} \cos \alpha_0 & p \text{ – поляризация,} \end{cases}$$

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

$$\tilde{n}_m = \begin{cases} n_m \cos \alpha_m & s \text{ – поляризация} \\ n_m^{-1} \cos \alpha_m & p \text{ – поляризация.} \end{cases}$$

Значения углов можно найти из закона Снеллиуса.

Согласно (2.22a), амплитудные коэффициента отражения для  $p$ - и  $s$ - компонент могут быть определены из следующих соотношений:

$$\begin{cases} r^s(\alpha_0) = \operatorname{Re}(r^s(\alpha_0)) + i \operatorname{Im}(r^s(\alpha_0)) = |r^s(\alpha_0)| e^{i\rho^s(\alpha_0)} \\ r^p(\alpha_0) = \operatorname{Re}(r^p(\alpha_0)) + i \operatorname{Im}(r^p(\alpha_0)) = |r^p(\alpha_0)| e^{i\rho^p(\alpha_0)}, \end{cases}$$

где

$$\rho^s(\alpha_0) = \frac{\operatorname{Im}(r^s(\alpha_0))}{\operatorname{Re}(r^s(\alpha_0))} \quad \rho^p(\alpha_0) = \frac{\operatorname{Im}(r^p(\alpha_0))}{\operatorname{Re}(r^p(\alpha_0))}.$$

Для рассматриваемого случая распределение фазы отражённого излучения по углам падения излучения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение на длине волн  $\lambda = \lambda_0$ , представлено на рис. 2.14.

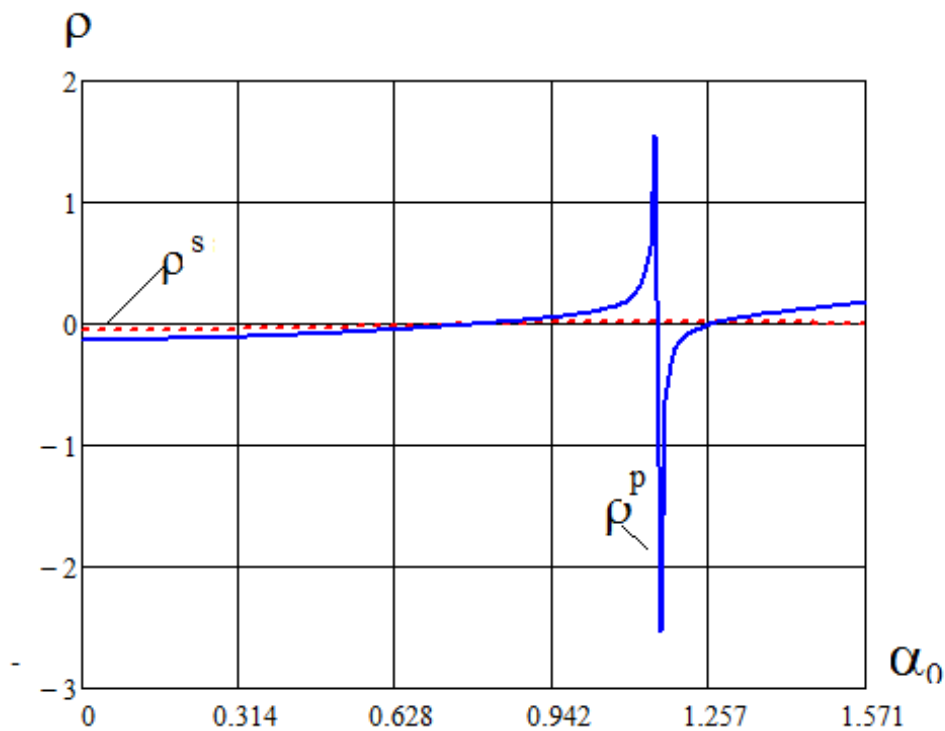


Рисунок 2.14 — Распределение фазы отражённого излучения по углам падения излучения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение на длине волн  $\lambda = \lambda_0$

**2.9 Определение спектральных характеристик энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого присутствует поглощение. Показатель преломления такого слоя имеет вид  $(n-ik)$ . Схема хода лучей представлена на рис. 2.15**

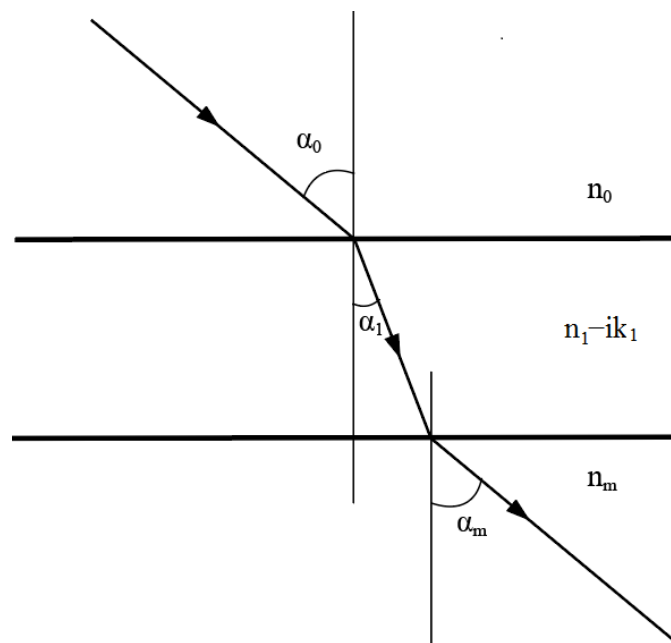


Рисунок 2.15 — Иллюстрация к задаче 2.9

**Задача 2.9.1.** Необходимо определить спектральную характеристику энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого присутствует поглощение. Слой сформирован из материала, параметры которого представлены в таблице, его геометрическая толщина равна 20нм, излучение падает по нормали в диапазоне длин волн (300-800)нм. Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.6$ . Рассмотреть две ситуации: 1- излучение падает из среды с показателем преломления 1.0 и 2- излучение падает из среды с показателем преломления 1.60.

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_1$	0.04	0.07	0.15	0.33	0.44	0.65	1.00	1.24	1.37	1.81	2.00
$k_1$	2.35	2.55	2.85	2.90	3.03	3.94	4.75	5.50	6.80	7.00	7.10

**Задача 2.9.2.** Необходимо определить спектральную характеристику энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого присутствует поглощение. Слой сформирован из материала, параметры которого представлены в таблице, его геометрическая толщина равна 25нм, излучение падает по нормали в диапазоне длин волн (300-800)нм. Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.55$ . Рассмотреть две ситуации: 1- излучение падает из среды с показателем преломления 1.0 и 2- излучение падает из среды с показателем преломления 1.55.

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_1$	0.64	0.77	0.85	0.93	1.14	1.55	1.70	1.94	2.17	2.30	2.80
$k_1$	2.35	3.65	3.85	3.90	4.03	4.44	4.75	5.20	6.50	7.10	7.50

**Задача 2.9.3.** Необходимо определить спектральную характеристику энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого присутствует поглощение. Слой сформирован из материала, параметры которого представлены в таблице, его геометрическая толщина равна 20нм, излучение падает по нормали в диапазоне длин волн (300-800)нм. Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.75$ . Рассмотреть две ситуации: 1- излучение падает из среды с показателем преломления 1.0 и 2- излучение падает из среды с показателем преломления 1.75.

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_1$	0.24	0.47	0.55	0.63	0.74	0.89	1.10	1.44	1.57	1.81	2.00
$k_1$	2.35	3.65	3.85	3.90	4.03	4.44	4.75	5.20	6.50	7.10	7.50

**Задача 2.9.4.** Необходимо определить спектральную характеристику энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого присутствует поглощение. Слой сформирован из материала, параметры которого представлены в таблице, его геометрическая толщина равна 22нм, излучение падает по нормали в диапазоне длин волн (300-800) нм. Показатели

преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.54$ . Рассмотреть две ситуации: 1- излучение падает из среды с показателем преломления 1.0 и 2- излучение падает из среды с показателем преломления 1.54.

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_1$	0.04	0.07	0.15	0.33	0.44	0.65	1.00	1.24	1.37	1.81	2.00
$k_1$	2.05	2.05	2.55	2.70	3.03	3.54	3.75	4.50	4.80	5.00	5.10

**Задача 2.9.5.** Необходимо определить спектральную характеристику энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого присутствует поглощение. Слой сформирован из материала, параметры которого представлены в таблице, его геометрическая толщина равна 20нм, излучение падает по нормали в диапазоне длин волн (300-800) нм. Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.5$ . Рассмотреть две ситуации: 1- излучение падает из среды с показателем преломления 1.0 и 2- излучение падает из среды с показателем преломления 1.50.

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_1$	0.64	0.77	0.85	0.93	1.14	1.55	1.70	1.94	2.17	2.30	2.80
$k_1$	2.05	2.05	2.55	2.70	3.03	3.54	3.75	4.50	4.80	5.00	5.10

**Задача 2.9.6.** Необходимо определить спектральную характеристику энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого присутствует поглощение. Слой сформирован из материала, параметры которого представлены в таблице, его геометрическая толщина равна 17нм, излучение падает по нормали в диапазоне длин волн (300-800) нм. Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.66$ . Рассмотреть две ситуации: 1- излучение падает из среды с показателем преломления 1.0 и 2- излучение падает из среды с показателем преломления 1.66.

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_1$	0.64	0.77	0.85	0.93	1.14	1.55	1.70	1.94	2.17	2.30	2.80
$k_1$	0.95	1.25	1.55	1.90	2.03	2.94	3.25	3.50	4.80	5.30	5.90

**Задача 2.9.7.** Необходимо определить спектральную характеристику энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого присутствует поглощение. Слой сформирован из материала, параметры которого представлены в таблице, его геометрическая толщина равна 26нм, излучение падает по нормали в диапазоне длин волн (300-800) нм. Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.57$ . Рассмотреть две ситуации: 1- излучение падает из среды с показателем преломления 1.0 и 2- излучение падает из среды с показателем преломления 1.57.

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_1$	0.74	0.67	0.45	1.53	1.74	2.85	3.00	3.44	3.57	4.21	4.40
$k_1$	0.95	1.25	1.55	1.90	2.03	2.94	3.25	3.50	4.80	5.30	5.90

**Задача 2.9.8.** Необходимо определить спектральную характеристику энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого присутствует поглощение. Слой сформирован из материала, параметры которого представлены в таблице, его геометрическая толщина равна 16нм, излучение падает по нормали в диапазоне длин волн (300-800) нм. Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.58$ . Рассмотреть две ситуации: 1- излучение падает из среды с показателем преломления 1.0 и 2- излучение падает из среды с показателем преломления 1.58.

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_1$	0.24	0.47	0.55	0.63	0.74	0.89	1.10	1.44	1.57	1081	2.00
$k_1$	2.05	2.05	2.55	2.70	3.03	3.54	3.75	4.50	4.80	5.00	5.10

**Задача 2.9.9.** Необходимо определить спектральную характеристику энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого присутствует поглощение. Слой сформирован из материала, параметры которого представлены в таблице, его геометрическая толщина равна 25нм, излучение падает по нормали в диапазоне длин волн (300-800) нм. Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.69$ . Рассмотреть две ситуации: 1- излучение падает из среды с показателем преломления 1.0 и 2- излучение падает из среды с показателем преломления 1.69.

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_1$	0.34	0.47	0.55	0.73	0.94	1.25	1.40	1.74	1.97	2.81	3.00
$k_1$	2.05	2.05	2.55	2.70	3.03	3.54	3.75	4.50	4.80	5.00	5.10

**Задача 2.9.10.** Необходимо определить спектральную характеристику энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого присутствует поглощение. Слой сформирован из материала, параметры которого представлены в таблице, его геометрическая толщина равна 24нм, излучение падает по нормали в диапазоне длин волн (300-800) нм. Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.5$ . Рассмотреть две ситуации: 1- излучение падает из среды с показателем преломления 1.0 и 2- излучение падает из среды с показателем преломления 1.50.

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_1$	0.04	0.07	0.15	0.33	0.44	0.65	1.00	1.24	1.37	1.81	2.00
$k_1$	2.35	2.55	2.85	2.90	3.03	3.94	4.75	5.50	6.80	7.00	7.10

**Задача 2.9.11.** Необходимо определить спектральную характеристику энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого присутствует поглощение. Слой сформирован из материала, параметры которого представлены в таблице, его геометрическая толщина равна 21нм, излучение падает по нормали в диапазоне длин волн (300-800) нм. Показатели

преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.85$ . Рассмотреть две ситуации: 1- излучение падает из среды с показателем преломления 1.0 и 2- излучение падает из среды с показателем преломления 1.85.

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_1$	0.14	0.17	0.25	0.53	0.74	0.85	1.20	1.44	1.57	1.81	2.00
$k_1$	2.35	2.55	2.85	2.90	3.03	3.94	4.75	5.50	6.80	7.00	7.10

**Задача 2.9.12.** Необходимо определить спектральную характеристику энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого присутствует поглощение. Слой сформирован из материала, параметры которого представлены в таблице, его геометрическая толщина равна 22нм, излучение падает по нормали в диапазоне длин волн (300-800) нм. Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.75$ . Рассмотреть две ситуации: 1- излучение падает из среды с показателем преломления 1.0 и 2- излучение падает из среды с показателем преломления 1.75.

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_1$	0.74	0.67	0.45	1.53	1.74	2.85	3.00	3.44	3.57	4.21	4.40
$k_1$	1.35	1.55	1.85	1.90	2.03	2.94	3.25	3.50	3.80	6.00	6.10

### Пример решения задачи данного вида

В условиях задачи заданы следующие величины:  $n_0=1.00$ ,  $n_m=1.72$ , параметры слоя – слой сформирован из материала, параметры которого представлены в таблице, его геометрическая толщина равна 20нм, излучение падает по нормали в диапазоне длин волн (300-800) нм. Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.65$ . Рассмотреть две ситуации: 1- излучение падает из среды с показателем преломления 1.0 и 2- излучение падает из среды с показателем преломления 1.65.

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_1$	0.25	0.35	0.45	0.50	0.64	0.82	1.06	1.30	1.55	1.77	1.99
$k_1$	3.33	3.80	4.42	4.92	5.50	5.99	6.55	7.11	7.00	7.03	7.05

Решение задачи следует начать с задания массивов  $n_1$  и  $k_1$  для заданных длин волн, поскольку показатели преломления и коэффициенты поглощения в большинстве случаев обладают существенной дисперсией, далее следует определить фазовую толщину слоя согласно выражению (2.21):

$$\varphi_1 = 2\pi(n_1 - ik_1)d_1(\lambda)^{-1},$$

для рассматриваемого случая.

Далее следует определить амплитудный коэффициент отражения для данной системы из соотношения:

$$r(\lambda) = \frac{(n_0 \cos \varphi_1(\lambda) - n_m \cos \varphi_1(\lambda)) + i(n_0 n_m \tilde{n}_1^{-1} \sin \varphi_1(\lambda) - m_{21} \tilde{n}_1 \sin \varphi_1(\lambda))}{(n_0 \cos \varphi_1(\lambda) + n_m \cos \varphi_1(\lambda)) + i(n_0 n_m \tilde{n}_1^{-1} \sin \varphi_1(\lambda) + m_{21} \tilde{n}_1 \sin \varphi_1(\lambda))}.$$

При условии, что

$$\tilde{n}_1 = n_1 - ik_1,$$

энергетический коэффициент отражения

$$R(\lambda) = |r(\lambda)|^2.$$

Для рассматриваемого случая спектральная характеристика энергетического коэффициента отражения имеет вид, показанный на рис. 2.16.

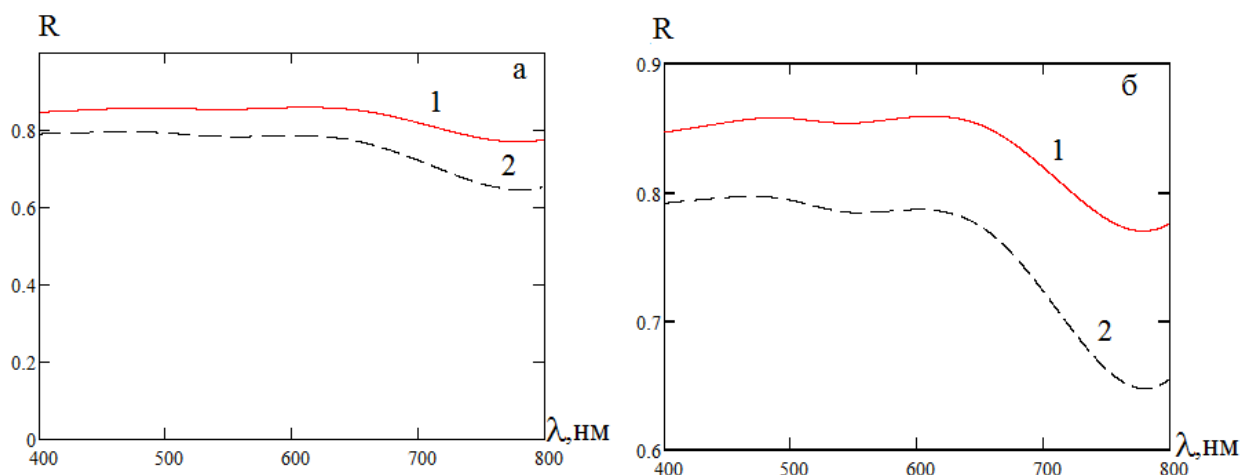


Рисунок 2.16 — Спектральная характеристика энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого присутствует поглощение. Кривая 1 – излучение падает из среды с меньшим показателем преломления (1.0), 2 – излучение падает из среды с большим показателем преломления (1.72) Фрагменты «а» и «б» отличаются масштабом изображения

**2.10 Определение спектральных характеристик энергетического коэффициента отражения  $s$ - и  $p$ - компонент для случая, когда на поверхности оптического элемента присутствует слой из материала, у которого присутствует поглощение. Излучение падает в заданном диапазоне углов на известной длине волны. Схема хода лучей представлена на рис. 2.9**

**Задача 2.10.1.** Необходимо определить распределение по углам энергетического коэффициента отражения  $s$ - и  $p$ - компонент для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого присутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления  $1.35+3.2i$ , его геометрическая толщина равна  $0.05\lambda_0$ , излучение падает на длине волны  $\lambda_0$ , угол падения излучения лежит в диапазоне  $0 < \alpha_0 \leq \pi/2$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.5$ . Рассмотреть две ситуации: 1- излучение падает из среды с показателем преломления 1.0 и 2- излучение падает из среды с показателем преломления 1.50.

**Задача 2.10.2.** Необходимо определить распределение по углам энергетического коэффициента отражения  $s$ - и  $p$ - компонент для случая, когда

на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого присутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления  $1.05+3.2i$ , его геометрическая толщина равна  $0.06\lambda_0$ , излучение падает на длине волны  $\lambda_0$ , угол падения излучения лежит в диапазоне  $0 < \alpha_0 \leq \pi/2$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.5$ . Рассмотреть две ситуации: 1- излучение падает из среды с показателем преломления 1.0 и 2- излучение падает из среды с показателем преломления 1.50.

**Задача 2.10.3.** Необходимо определить распределение по углам энергетического коэффициента отражения  $s$ - и  $p$ - компонент для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого присутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления  $1.05+4.2i$ , его геометрическая толщина равна  $0.055\lambda_0$ , излучение падает на длине волны  $\lambda_0$ , угол падения излучения лежит в диапазоне  $0 < \alpha_0 \leq \pi/2$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.5$ . Рассмотреть две ситуации: 1- излучение падает из среды с показателем преломления 1.0 и 2- излучение падает из среды с показателем преломления 1.50.

**Задача 2.10.4.** Необходимо определить распределение по углам энергетического коэффициента отражения  $s$ - и  $p$ - компонент для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого присутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления  $0.35+5.2i$ , его геометрическая толщина равна  $0.05\lambda_0$ , излучение падает на длине волны  $\lambda_0$ , угол падения излучения лежит в диапазоне  $0 < \alpha_0 \leq \pi/2$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.5$ . Рассмотреть две ситуации: 1- излучение падает из среды с показателем преломления 1.0 и 2- излучение падает из среды с показателем преломления 1.50.

**Задача 2.10.5.** Необходимо определить распределение по углам энергетического коэффициента отражения  $s$ - и  $p$ - компонент для случая, когда на поверхность оптического геометрическая элемента нанесён слой из материала, у которого присутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления  $1.15+4.5i$ , его оптическая толщина равна  $0.02\lambda_0$ , излучение падает на длине волны  $\lambda_0$ , угол падения излучения лежит в диапазоне  $0 < \alpha_0 \leq \pi/2$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.5$ . Рассмотреть две ситуации: 1- излучение падает из среды с показателем преломления 1.0 и 2- излучение падает из среды с показателем преломления 1.50.

**Задача 2.10.6.** Необходимо определить распределение по углам энергетического коэффициента отражения  $s$ - и  $p$ - компонент для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого присутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления  $1.75+6.1i$ , его геометрическая толщина равна  $0.05\lambda_0$ , излучение падает на длине волны  $\lambda_0$ , угол падения излучения лежит в диапазоне  $0 < \alpha_0 \leq \pi/2$ .



Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.5$ . Рассмотреть две ситуации: 1- излучение падает из среды с показателем преломления 1.0 и 2- излучение падает из среды с показателем преломления 1.50.

**Задача 2.10.7.** Необходимо определить распределение по углам энергетического коэффициента отражения  $s$ - и  $p$ - компонент для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого присутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления  $1.05+6.7i$ , его геометрическая толщина равна  $0.042\lambda_0$ , излучение падает на длине волны  $\lambda_0$ , угол падения излучения лежит в диапазоне  $0 < \alpha_0 \leq \pi/2$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.5$ . Рассмотреть две ситуации: 1- излучение падает из среды с показателем преломления 1.0 и 2- излучение падает из среды с показателем преломления 1.50.

**Задача 2.10.8.** Необходимо определить распределение по углам энергетического коэффициента отражения  $s$ - и  $p$ - компонент для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого присутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления  $1.15+1.77i$ , его геометрическая толщина равна  $0.021\lambda_0$ , излучение падает на длине волны  $\lambda_0$ , угол падения излучения лежит в диапазоне  $0 < \alpha_0 \leq \pi/2$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.5$ . Рассмотреть две ситуации: 1- излучение падает из среды с показателем преломления 1.0 и 2- излучение падает из среды с показателем преломления 1.50.

**Задача 2.10.9.** Необходимо определить распределение по углам энергетического коэффициента отражения  $s$ - и  $p$ - компонент для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого присутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления  $0.95+3.8i$ , его геометрическая толщина равна  $0.037\lambda_0$ , излучение падает на длине волны  $\lambda_0$ , угол падения излучения лежит в диапазоне  $0 < \alpha_0 \leq \pi/2$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.5$ . Рассмотреть две ситуации: 1- излучение падает из среды с показателем преломления 1.0 и 2- излучение падает из среды с показателем преломления 1.50.

**Задача 2.10.10.** Необходимо определить распределение по углам энергетического коэффициента отражения  $s$ - и  $p$ - компонент для случая, когда на поверхность оптического геометрическая элемента нанесён слой из материала, у которого присутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления  $1.85+3.9i$ , его оптическая толщина равна  $0.027\lambda_0$ , излучение падает на длине волны  $\lambda_0$ , угол падения излучения лежит в диапазоне  $0 < \alpha_0 \leq \pi/2$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.5$ . Рассмотреть две ситуации: 1- излучение падает из среды с показателем преломления 1.0 и 2- излучение падает из среды с показателем преломления 1.50.

**Задача 2.10.11.** Необходимо определить распределение по углам энергетического коэффициента отражения  $s$ - и  $p$ - компонент для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого присутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления  $0.35+3.7i$ , его геометрическая толщина равна  $0.051\lambda_0$ , излучение падает на длине волны  $\lambda_0$ , угол падения излучения лежит в диапазоне  $0 < \alpha_0 \leq \pi/2$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.5$ . Рассмотреть две ситуации: 1- излучение падает из среды с показателем преломления 1.0 и 2- излучение падает из среды с показателем преломления 1.50.

**Задача 2.10.12.** Необходимо определить распределение по углам энергетического коэффициента отражения  $s$ - и  $p$ - компонент для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого присутствует поглощение. Слой сформирован из материала с показателем преломления  $0.75+6.7i$ , его геометрическая толщина равна  $0.034\lambda_0$ , излучение падает на длине волны  $\lambda_0$ , угол падения излучения лежит в диапазоне  $0 < \alpha_0 \leq \pi/2$ . Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.5$ . Рассмотреть две ситуации: 1- излучение падает из среды с показателем преломления 1.0 и 2- излучение падает из среды с показателем преломления 1.50.

### Пример решения задачи данного вида

В условиях задачи заданы следующие величины:  $n_0=1.00$ ,  $n_m=1.65$ , параметры слоя – слой сформирован из материала с показателем преломления 1.10 и коэффициентом поглощения 2.2, оптическая толщина  $d_1 = 0.003 \lambda_0$ , излучение падает на длине волны  $\lambda_0$ , угол падения излучения лежит в диапазоне  $0 < \alpha_0 \leq \pi/2$ .

Решение задачи следует начать с определения фазовой толщины слоя, которая может быть определена согласно выражению (2.21):

$$\hat{\varphi}_1 = 2\pi(n_1 - ik_1)d_1(\lambda)^{-1} \cos \alpha_1,$$

для рассматриваемого случая

$$\tilde{\varphi}_1 = 2\pi \cdot 0.023\lambda_0(n_1 - ik_1)(\lambda_0)^{-1},$$

т.е. фазовая толщина будет зависеть от угла падения излучения и от длины волны падающего излучения.

Далее следует определить показатели преломления материала, из которого изготовлен слой, и материалов, его обрамляющих, для  $p$ - и  $s$ -компонент.

Согласно (2.22)

$$\tilde{n}_i = \begin{cases} n_i \cos \alpha_i & s \text{ - поляризация} \\ n_i^{-1} \cos \alpha_i & p \text{ - поляризация,} \end{cases}$$

Следовательно

$$\tilde{n}_0 = \begin{cases} n_0 \cos \alpha_0 & s\text{-поляризация} \\ n_0^{-1} \cos \alpha_0 & p\text{-поляризация,} \end{cases}$$

$$\tilde{n}_1 = \begin{cases} (n_1 - ik_1) \cos \alpha_1 & s\text{-поляризация} \\ (n_1 - ik_1)^{-1} \cos \alpha_1 & p\text{-поляризация,} \end{cases}$$

$$\tilde{n}_m = \begin{cases} n_m \cos \alpha_m & s\text{-поляризация} \\ n_m^{-1} \cos \alpha_m & p\text{-поляризация.} \end{cases}$$

Значения углов можно найти из закона Снеллиуса.

Согласно (2.22a), амплитудные коэффициента отражения для  $p$ - и  $s$ -компонент могут быть определены из следующих соотношений

$$\left\{ \begin{array}{l} r^s(\alpha_0) = \frac{(n_0 \cos \alpha_0 - n_m \cos \alpha_m) \cos \tilde{\varphi}_1 + i \left( \frac{n_0 n_m \cos \alpha_0 \cos \alpha_m}{(n_1 - ik_1) \cos \alpha_1} - (n_1 - ik_1) \cos \alpha_1 \right) \sin \tilde{\varphi}_1}{(n_0 \cos \alpha_0 + n_m \cos \alpha_m) \cos \tilde{\varphi}_1 + i \left( \frac{n_0 n_m \cos \alpha_0 \cos \alpha_m}{(n_1 - ik_1) \cos \alpha_1} + (n_1 - ik_1) \cos \alpha_1 \right) \sin \tilde{\varphi}_1} \\ r^p(\alpha_0) = \frac{\left( \frac{\cos \alpha_0}{n_0} - \frac{\cos \alpha_m}{n_m} \right) \cos \tilde{\varphi}_1 + i \left( \frac{\cos \alpha_0 \cos \alpha_m}{n_0 n_m \cos \alpha_1} \frac{(n_1 - ik_1)}{\cos \alpha_1} - \frac{\cos \alpha_1}{(n_1 - ik_1)} \right) \sin \tilde{\varphi}_1}{\left( \frac{\cos \alpha_0}{n_0} + \frac{\cos \alpha_m}{n_m} \right) \cos \tilde{\varphi}_1 + i \left( \frac{\cos \alpha_0 \cos \alpha_m}{n_0 n_m \cos \alpha_1} \frac{(n_1 - ik_1)}{\cos \alpha_1} + \frac{\cos \alpha_1}{(n_1 - ik_1)} \right) \sin \tilde{\varphi}_1} \end{array} \right.$$

$$R(\alpha_0) = |r(\alpha_0)|^2.$$

Для рассматриваемого случая распределение энергетического коэффициента отражения  $s$ - и  $p$ -компонент от угла падения излучения для случая, когда на поверхности оптического элемента сформирован слой из материала, у которого присутствует поглощение на длине волн  $\lambda = \lambda_0$ , представлено на рис. 2.17.

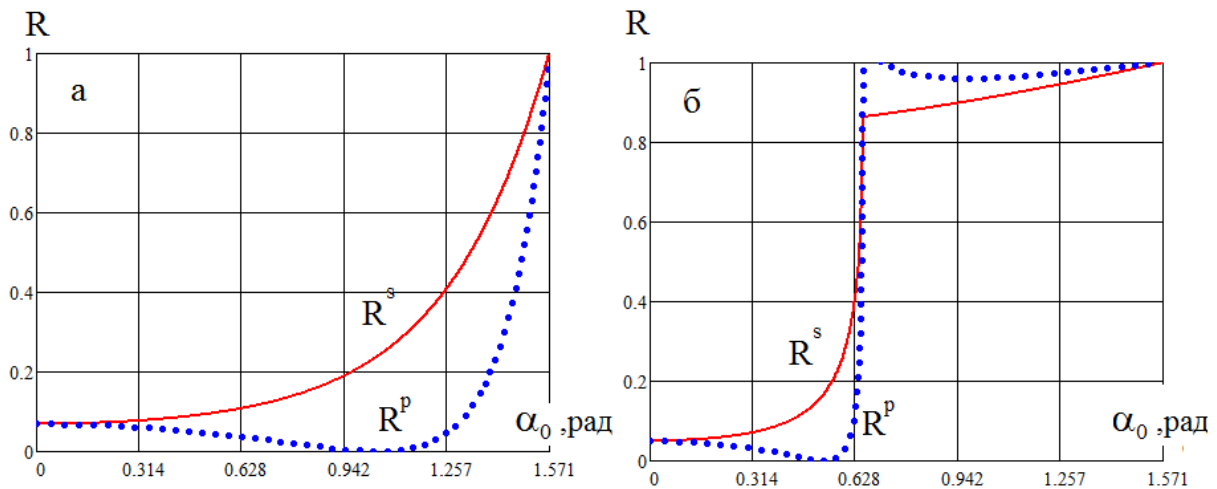


Рисунок 2.17 — Распределение по углам энергетического коэффициента отражения  $s$ - и  $p$ -компонент для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого присутствует поглощение. Фрагмент «а», излучение падает из среды с меньшим показателем преломления (1.0), фрагмент «б», излучение падает из среды с большим показателем преломления (1.65)

**2.11 Определение спектральных характеристик энергетического коэффициента отражения и пропускания для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого присутствует поглощение, значение которого много меньше 1. Показатель преломления такого слоя имеет вид  $(n-ik)$ . Схема хода лучей представлена на рис. 2.9**

**Задача 2.11.1.** Необходимо определить спектральные характеристики энергетических коэффициентов отражения и пропускания для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого присутствует поглощение. Слой сформирован из материала, параметры которого представлены в таблице, его геометрическая толщина равна 20нм, излучение падает по нормали в диапазоне длин волн (300-800)нм. Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.6$ . Сравнить положения экстремумов пропускания и отражения в шкале длин волн.

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_1$	0.4	0.7	0.15	0.33	0.44	0.65	1.00	1.24	1.37	1.81	2.00
$k_1 \cdot 10^{-3}$	5	11	13	14	18	23	26	29	32	35	39

**Задача 2.11.2.** Необходимо определить спектральную характеристику энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого присутствует поглощение. Слой сформирован из материала, параметры которого представлены в таблице, его геометрическая толщина равна 25нм, излучение падает по нормали в диапазоне длин волн (300-800) нм. Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.55$ . Сравнить положения экстремумов пропускания и отражения в шкале длин волн.

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_1$	0.34	0.47	0.55	0.73	0.94	1.15	1.30	1.44	1.57	1.70	1.89
$k_1 \cdot 10^{-3}$	5	11	13	14	18	23	26	29	32	35	39

**Задача 2.11.3.** Необходимо определить спектральную характеристику энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого присутствует поглощение. Слой сформирован из материала, параметры которого представлены в таблице, его геометрическая толщина равна 20нм, излучение падает по нормали в диапазоне длин волн (300-800)нм. Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.75$ . Сравнить положения экстремумов пропускания и отражения в шкале длин волн.

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_1$	0.24	0.47	0.55	0.63	0.74	0.89	1.10	1.44	1.57	1.81	2.00
$k_1 \cdot 10^{-3}$	5	11	13	14	18	23	26	29	32	35	39

**Задача 2.11.4.** Необходимо определить спектральную характеристику энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого присутствует

поглощение. Слой сформирован из материала, параметры которого представлены в таблице, его геометрическая толщина равна 22нм, излучение падает по нормали в диапазоне длин волн (300-800) нм. Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.54$ . Сравнить положения экстремумов пропускания и отражения в шкале длин волн.

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_1$	0.04	0.07	0.15	0.33	0.44	0.65	1.00	1.24	1.37	1.81	2.00
$k_1 \cdot 10^{-3}$	5	10	12	14	16	20	23	26	30	32	34

**Задача 2.11.5.** Необходимо определить спектральную характеристику энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого присутствует поглощение. Слой сформирован из материала, параметры которого представлены в таблице, его геометрическая толщина равна 20нм, излучение падает по нормали в диапазоне длин волн (300-800) нм. Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.5$ . Сравнить положения экстремумов пропускания и отражения в шкале длин волн.

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_1$	0.64	0.77	0.85	0.93	1.14	1.35	1.50	1.74	1.67	2.00	2.10
$k_1 \cdot 10^{-3}$	5	11	13	14	18	23	26	29	32	35	39

**Задача 2.11.6.** Необходимо определить спектральную характеристику энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого присутствует поглощение. Слой сформирован из материала, параметры которого представлены в таблице, его геометрическая толщина равна 17нм, излучение падает по нормали в диапазоне длин волн (300-800) нм. Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.66$ . Сравнить положения экстремумов пропускания и отражения в шкале длин волн.

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_1$	0.64	0.77	0.85	0.93	1.14	1.55	1.70	1.94	2.17	2.30	2.80
$k_1 \cdot 10^{-3}$	5	10	12	14	16	20	23	26	30	33	36

**Задача 2.11.7.** Необходимо определить спектральную характеристику энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого присутствует поглощение. Слой сформирован из материала, параметры которого представлены в таблице, его геометрическая толщина равна 26нм, излучение падает по нормали в диапазоне длин волн (300-800) нм. Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.57$ . Сравнить положения экстремумов пропускания и отражения в шкале длин волн.

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_1$	0.74	0.67	0.45	0.53	0.74	0.85	1.00	1.44	1.57	2.21	2.40
$k_1 \cdot 10^{-3}$	5	11	13	14	18	23	26	29	32	35	39

**Задача 2.11.8.** Необходимо определить спектральную характеристику энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого присутствует поглощение. Слой сформирован из материала, параметры которого представлены в таблице, его геометрическая толщина равна 16нм, излучение падает по нормали в диапазоне длин волн (300-800) нм. Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.58$ . Сравнить положения экстремумов пропускания и отражения в шкале длин волн.

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_1$	0.24	0.47	0.55	0.63	0.74	0.89	1.10	1.44	1.57	1.81	2.00
$k_1 \cdot 10^{-3}$	5	11	13	14	18	23	26	29	32	35	39

**Задача 2.11.9.** Необходимо определить спектральную характеристику энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого присутствует поглощение. Слой сформирован из материала, параметры которого представлены в таблице, его геометрическая толщина равна 25нм, излучение падает по нормали в диапазоне длин волн (300-800) нм. Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.69$ . Сравнить положения экстремумов пропускания и отражения в шкале длин волн.

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_1$	0.14	0.27	0.35	0.53	0.74	0.95	1.20	1.44	1.67	1.81	2.10
$k_1 \cdot 10^{-3}$	5	11	13	14	18	23	26	29	32	35	39

**Задача 2.11.10.** Необходимо определить спектральную характеристику энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого присутствует поглощение. Слой сформирован из материала, параметры которого представлены в таблице, его геометрическая толщина равна 21нм, излучение падает по нормали в диапазоне длин волн (300-800) нм. Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.5$ . Сравнить положения экстремумов пропускания и отражения в шкале длин волн.

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_1$	0.14	0.17	0.25	0.33	0.46	0.65	1.05	1.34	1.57	1.81	2.00
$k_1 \cdot 10^{-3}$	5	11	13	14	18	23	26	29	32	35	39

**Задача 2.11.11.** Необходимо определить спектральную характеристику энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого присутствует поглощение. Слой сформирован из материала, параметры которого представлены в таблице, его геометрическая толщина равна 21нм, излучение падает по нормали в диапазоне длин волн (300-800) нм. Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.85$ . Сравнить положения экстремумов пропускания и отражения в шкале длин волн.

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_1$	0.14	0.17	0.25	0.53	0.74	0.85	1.20	1.44	1.57	1.81	2.00
$k_1 10^{-3}$	5	11	13	14	18	23	26	29	32	35	39

**Задача 2.11.12.** Необходимо определить спектральную характеристику энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого присутствует поглощение. Слой сформирован из материала, параметры которого представлены в таблице, его геометрическая толщина равна 22 нм, излучение падает по нормали в диапазоне длин волн (300-800) нм. Показатели преломления обрамляющих сред:  $n_0=1$ ,  $n_m=1.75$ . Сравнить положения экстремумов пропускания и отражения в шкале длин волн.

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_1$	0.34	0.47	0.55	0.63	0.74	0.85	1.00	1.44	1.57	1.77	1.90
$k_1 10^{-3}$	5	11	13	14	18	23	26	29	32	35	39

### Пример решения задачи данного вида

В условиях задачи заданы следующие величины:  $n_0=1.00$ ,  $n_m=1.72$ , параметры слоя – слой сформирован из материала, параметры которого представлены в таблице. Геометрическая толщина слоя равна 22 нм.

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_1$	0.25	0.35	0.45	0.50	0.64	0.82	1.06	1.30	1.55	1.77	1.99
$k_1 10^{-3}$	5	11	13	14	18	23	26	29	36	38	39

Решение задачи следует начать с задания массивов  $n_1$  и  $k_1$  для заданных длин волн, поскольку показатели преломления и коэффициенты поглощения в большинстве случаев обладают существенной дисперсией, далее следует определить фазовую толщину слоя согласно выражению (2.21):

$$\varphi_1 = 2\pi(n_1 - ik_1)d_1(\lambda)^{-1}$$

Затем следует определить амплитудный коэффициент отражения для данной системы из соотношения:

$$r(\lambda) = \frac{(n_0 \cos \varphi_1(\lambda) - n_m \cos \varphi_1(\lambda)) + i(n_0 n_m \tilde{n}_1^{-1} \sin \varphi_1(\lambda) - m_{21} \tilde{n}_1 \sin \varphi_1(\lambda))}{(n_0 \cos \varphi_1(\lambda) + n_m \cos \varphi_1(\lambda)) + i(n_0 n_m \tilde{n}_1^{-1} \sin \varphi_1(\lambda) + m_{21} \tilde{n}_1 \sin \varphi_1(\lambda))},$$

при условии, что

$$\tilde{n}_1 = n_1 - ik_1,$$

энергетический коэффициент отражения

$$R(\lambda) = |r(\lambda)|^2.$$

Для рассматриваемого случая спектральная характеристика энергетического коэффициента отражения представлена на рис. 2.18.

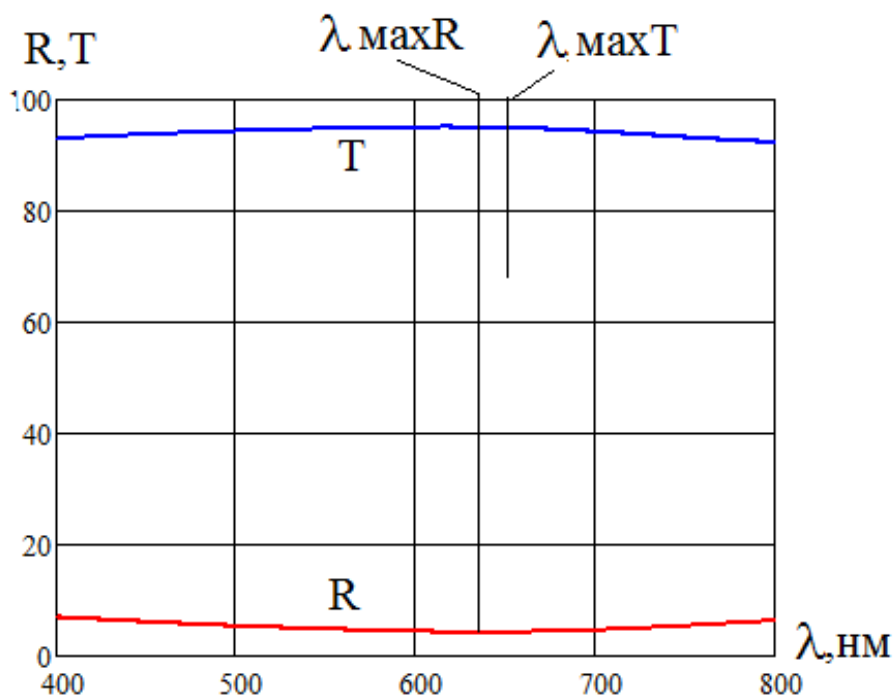


Рисунок 2.18 — Спектральные характеристики энергетического коэффициента отражения и пропускания для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого присутствует незначительное поглощение. Характеристики поглощающего слоя представлены в условиях рассматриваемой задачи

**2.12 Определение спектральных характеристик энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента, изготовленного из материала поглощением, нанесён слой из непоглощающего материала (схема хода лучей показана на рис. 2.19)**

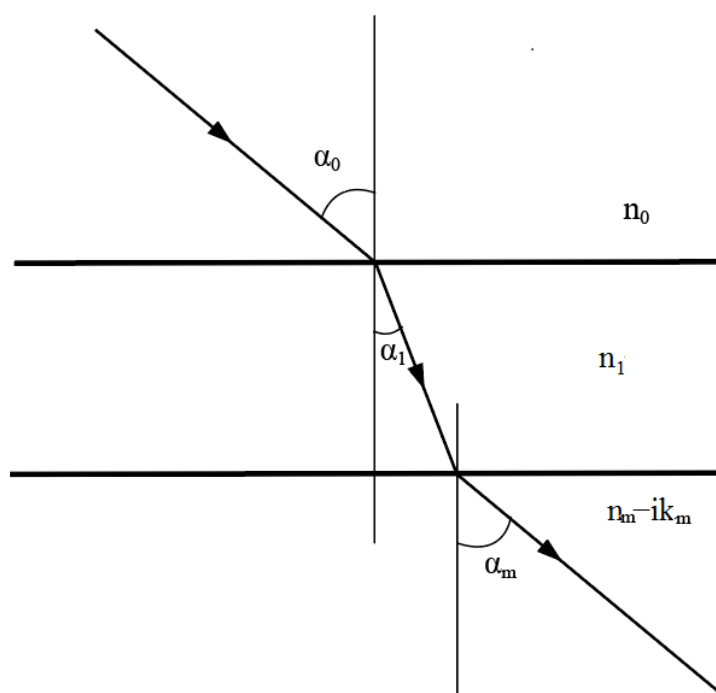


Рисунок 2.19 — Рисунок к задаче 2.12



**Задача 2.12.1.** Необходимо определить спектральную характеристику энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение, показатель преломления и коэффициент поглощения материала, используемый для изготовления оптического элемента, на котором формируется слой, представлены в таблице:

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_1$	0.34	0.47	0.55	0.73	0.94	1.25	1.40	1.74	1.97	2.81	3.00
$k_1$	2.05	2.05	2.55	2.70	3.03	3.54	3.75	4.50	4.80	5.00	5.10

Оптическая толщина слоя  $n_1 d_1 = 0.25 \lambda_0$ , где  $\lambda_0 = 500$  нм, слой изготовлен из материала с показателем преломления 1.75. Излучение падает по нормали в диапазоне длин волн (300-800) нм. Показатель преломления среды, из которой падает излучение,  $n_0 = 1$ .

**Задача 2.12.2.** Необходимо определить спектральную характеристику энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение, показатель преломления и коэффициент поглощения материала, используемый для изготовления оптического элемента, на котором формируется слой, представлены в таблице:

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_1$	0.64	0.77	0.85	0.93	1.14	1.55	1.70	1.94	2.17	2.30	2.80
$k_1$	2.35	3.65	3.85	3.90	4.03	4.44	4.75	5.20	6.50	7.10	7.50

Оптическая толщина слоя  $n_1 d_1 = 0.25 \lambda_0$ , где  $\lambda_0 = 500$  нм, слой изготовлен из материала с показателем преломления 2.0. Излучение падает по нормали в диапазоне длин волн (300-800) нм. Показатель преломления среды, из которой падает излучение,  $n_0 = 1$ .

**Задача 2.12.3.** Необходимо определить спектральную характеристику энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение, показатель преломления и коэффициент поглощения материала, используемый для изготовления оптического элемента, на котором формируется слой, представлены в таблице:

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_1$	0.24	0.47	0.55	0.63	0.74	0.89	1.10	1.44	1.57	1.81	2.00
$k_1$	2.35	3.65	3.85	3.90	4.03	4.44	4.75	5.20	6.50	7.10	7.50

Оптическая толщина слоя  $n_1 d_1 = 0.25 \lambda_0$ , где  $\lambda_0 = 500$  нм, слой изготовлен из материала с показателем преломления 2.20. Излучение падает по нормали в диапазоне длин волн (300-800) нм. Показатель преломления среды, из которой падает излучение,  $n_0 = 1$ .

**Задача 2.13.4.** Необходимо определить спектральную характеристику энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение, показатель преломления и коэффициент поглощения материала, используемый для изготовления оптического элемента, на котором формируется слой, представлены в таблице:

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_1$	0.04	0.07	0.15	0.33	0.44	0.65	1.00	1.24	1.37	1.81	2.00
$k_1$	2.05	2.05	2.55	2.70	3.03	3.54	3.75	4.50	4.80	5.00	5.10

Оптическая толщина слоя  $n_1 d_1 = 0.25 \lambda_0$ , где  $\lambda_0 = 500$  нм, слой изготовлен из материала с показателем преломления 1.65. Излучение падает по нормали в диапазоне длин волн (300-800) нм. Показатель преломления среды, из которой падает излучение,  $n_0 = 1$ .

**Задача 2.12.5.** Необходимо определить спектральную характеристику энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение, показатель преломления и коэффициент поглощения материала, используемый для изготовления оптического элемента, на котором формируется слой, представлены в таблице:

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_1$	0.64	0.77	0.85	0.93	1.14	1.55	1.70	1.94	2.17	2.30	2.80
$k_1$	2.05	2.05	2.55	2.70	3.03	3.54	3.75	4.50	4.80	5.00	5.10

Оптическая толщина слоя  $n_1 d_1 = 0.25 \lambda_0$ , где  $\lambda_0 = 500$  нм, слой изготовлен из материала с показателем преломления 2.30. Излучение падает по нормали в диапазоне длин волн (300-800) нм. Показатель преломления среды, из которой падает излучение,  $n_0 = 1$ .

**Задача 2.12.6.** Необходимо определить спектральную характеристику энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение, показатель преломления и коэффициент поглощения материала, используемый для изготовления оптического элемента, на котором формируется слой, представлены в таблице:

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_1$	0.64	0.77	0.85	0.93	1.14	1.55	1.70	1.94	2.17	2.30	2.80
$k_1$	0.95	1.25	1.55	1.90	2.03	2.94	3.25	3.50	4.80	5.30	5.90

Оптическая толщина слоя  $n_1 d_1 = 0.25 \lambda_0$ , где  $\lambda_0 = 500$  нм, слой изготовлен из материала с показателем преломления 2.5. Излучение падает по нормали в диапазоне длин волн (300-800) нм. Показатель преломления среды, из которой падает излучение,  $n_0 = 1$ .

**Задача 2.12.7.** Необходимо определить спектральную характеристику энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение, показатель преломления и коэффициент поглощения материала, используемый для изготовления оптического элемента, на котором формируется слой, представлены в таблице:

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_1$	0.74	0.67	0.45	1.53	1.74	2.85	3.00	3.44	3.57	4.21	4.40
$k_1$	0.95	1.25	1.55	1.90	2.03	2.94	3.25	3.50	4.80	5.30	5.90

Оптическая толщина слоя  $n_1 d_1 = 0.25 \lambda_0$ , где  $\lambda_0 = 500$  нм, слой изготовлен из материала с показателем преломления 2.10. Излучение падает по нормали в диапазоне длин волн (300-800) нм. Показатель преломления среды, из которой падает излучение,  $n_0 = 1$ .

**Задача 2.12.8.** Необходимо определить спектральную характеристику энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение, показатель преломления и коэффициент поглощения материала, используемый для изготовления оптического элемента, на котором формируется слой, представлены в таблице:

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_1$	0.24	0.47	0.55	0.63	0.74	0.89	1.10	1.44	1.57	1081	2.00
$k_1$	2.05	2.05	2.55	2.70	3.03	3.54	3.75	4.50	4.80	5.00	5.10

Оптическая толщина слоя  $n_1 d_1 = 0.25 \lambda_0$ , где  $\lambda_0 = 500$  нм, слой изготовлен из материала с показателем преломления 2.10. Излучение падает по нормали в диапазоне длин волн (300-800) нм. Показатель преломления среды, из которой падает излучение,  $n_0 = 1$ .

**Задача 2.12.9.** Необходимо определить спектральную характеристику энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение, показатель преломления и коэффициент поглощения материала, используемый для изготовления оптического элемента, на котором формируется слой, представлены в таблице:

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_1$	0.04	0.07	0.15	0.33	0.44	0.65	1.00	1.24	1.37	1.81	2.00
$k_1$	2.35	2.55	2.85	2.90	3.03	3.94	4.75	5.50	6.80	7.00	7.10

Оптическая толщина слоя  $n_1 d_1 = 0.25 \lambda_0$ , где  $\lambda_0 = 500$  нм, слой изготовлен из материала с показателем преломления 2.15. Излучение падает по нормали в диапазоне длин волн (300-800) нм. Показатель преломления среды, из которой падает излучение,  $n_0 = 1$ .

**Задача 2.12.10.** Необходимо определить спектральную характеристику энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение, показатель преломления и коэффициент поглощения материала, используемый для изготовления оптического элемента, на котором формируется слой, представлены в таблице:

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_1$	0.04	0.07	0.15	0.33	0.44	0.65	1.00	1.24	1.37	1.81	2.00
$k_1$	2.35	2.55	2.85	2.90	3.03	3.94	4.75	5.50	6.80	7.00	7.10

Оптическая толщина слоя  $n_1 d_1 = 0.25 \lambda_0$ , где  $\lambda_0 = 500$  нм, слой изготовлен из материала с показателем преломления 1.95. Излучение падает по нормали в диапазоне длин волн (300-800) нм. Показатель преломления среды, из которой падает излучение,  $n_0 = 1$ .

**Задача 2.12.11.** Необходимо определить спектральную характеристику энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение, показатель преломления и коэффициент поглощения материала, используемый для изготовления оптического элемента, на котором формируется слой, представлены в таблице:

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_1$	0.14	0.17	0.25	0.53	0.74	0.85	1.20	1.44	1.57	1.81	2.00
$k_1$	2.35	2.55	2.85	2.90	3.03	3.94	4.75	5.50	6.80	7.00	7.10

Оптическая толщина слоя  $n_1 d_1 = 0.25 \lambda_0$ , где  $\lambda_0 = 500$  нм, слой изготовлен из материала с показателем преломления 2.25. Излучение падает по нормали в диапазоне длин волн (300-800) нм. Показатель преломления среды, из которой падает излучение,  $n_0 = 1$ .

**Задача 2.12.12.** Необходимо определить спектральную характеристику энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение, показатель преломления и коэффициент поглощения материала, из которого изготовлен оптический элемент, на котором формируется слой, представлены в таблице:

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_1$	0.74	0.67	0.45	1.53	1.74	2.85	3.00	3.44	3.57	4.21	4.40
$k_1$	1.35	1.55	1.85	1.90	2.03	2.94	3.25	3.50	3.80	6.00	6.10

Оптическая толщина слоя  $n_1 d_1 = 0.25 \lambda_0$ , где  $\lambda_0 = 500$  нм, слой изготовлен из материала с показателем преломления 2.0. Излучение падает по нормали в диапазоне длин волн (300-800) нм. Показатель преломления среды, из которой падает излучение,  $n_0 = 1$ .

## Пример решения задачи данного вида

В условиях задачи заданы следующие величины:  $n_0=1.00$ ,  $n_m=1.72$ , оптическая толщина слоя  $n_1 d_1=0.25 \lambda_0$ , где  $\lambda_0=500\text{нм}$ , слой изготовлен из материала с показателем преломления 2.0. Показатель преломления и коэффициент поглощения материала, из которого изготовлен оптический элемент, на котором формируется слой:

$\lambda$ , нм	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$n_1$	0.25	0.35	0.45	0.50	0.64	0.82	1.06	1.30	1.55	1.77	1.99
$k_1$	3.33	3.85	4.40	4.87	5.52	6.00	6.60	7.11	7.00	7.03	7.05

Решение задачи следует начать с задания массивов  $n_1$  и  $k_1$  для заданных длин волн, поскольку показатели преломления и коэффициенты поглощения в большинстве случаев обладают существенной дисперсией, далее следует определить фазовую толщину слоя согласно выражению (2.21):

$$\varphi_1 = 2\pi n_1 d_1 (\lambda)^{-1} = 0.5\pi (\lambda)^{-1}$$

для рассматриваемого случая.

Затем следует определить амплитудный коэффициент отражения для данной системы из соотношения:

$$r(\lambda) = \frac{(n_0 \cos \varphi_1(\lambda) - \tilde{n}_m \cos \varphi_1(\lambda)) + i(n_0 n_m n_1^{-1} \sin \varphi_1(\lambda) - m_{21} n_1 \sin \varphi_1(\lambda))}{(n_0 \cos \varphi_1(\lambda) + \tilde{n}_m \cos \varphi_1(\lambda)) + i(n_0 n_m n_1^{-1} \sin \varphi_1(\lambda) + m_{21} n_1 \sin \varphi_1(\lambda))},$$

при условии, что

$$\tilde{n}_m = n_m - ik_m,$$

энергетический коэффициент отражения

$$R(\lambda) = |r(\lambda)|^2.$$

Для рассматриваемого случая спектральная характеристика энергетического коэффициента отражения представлена на рис. 2.20.

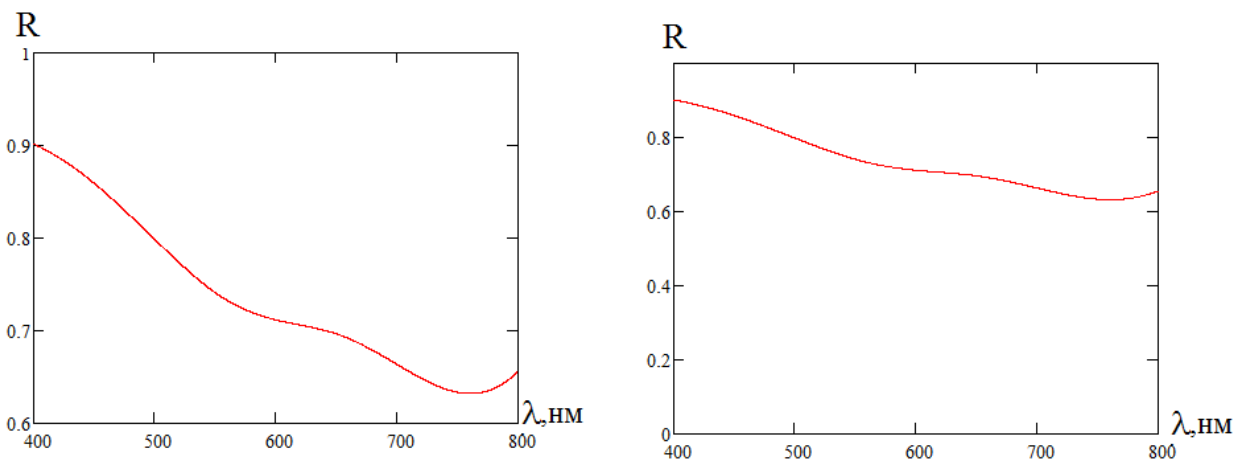


Рисунок 2.20 — Спектральные характеристики энергетического коэффициента отражения для случая, когда на поверхность оптического элемента нанесён слой из материала, у которого отсутствует поглощение, а материал на котором формируется слой, обладает поглощением. Характеристики поглощающего слоя представлены в условиях рассматриваемой задачи

## Литература

1. Путилин Э.С., Губанова Л.А. Оптические покрытия, СПб: Лань. 2015. -267с.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука. - 1970. -856 с.
3. Бергнинг П.Х. Теория и методы расчета оптических свойств тонких пленок Физика тонких пленок // под ред. Г.Хасса - М.: Мир - 1967. - Т.1 - С.91 – 151.

Губанова Людмила Александровна

## **Фотоника поверхности**

**Учебно-методическое пособие**

В авторской редакции  
Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО  
Зав. РИО  
Подписано к печати  
Заказ №  
Тираж  
Отпечатано на ризографе

Н.Ф. Гусарова

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