

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования

«Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники»

## **ОПТИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

Методические указания по практическим занятиям  
по дисциплине «Оптическое материаловедение»

2018

Кистенева М.Г.

Оптическое материаловедение = Оптическое материаловедение: Методические указания по практическим занятиям по дисциплине «Оптическое материаловедение» /М.Г. Кистенева; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. – Томск: ТУСУР, 2018. – 54 с.

В методических указаниях приведен краткий обзор необходимых теоретических сведений, примеры типовых задач и задания для самостоятельного решения по дисциплине «Оптическое материаловедение».

Целью данного пособия является закрепление и углубление представлений об оптических свойствах твердых тел, приобретение практических навыков по расчету оптических характеристик твердых тел. Даны примеры решения типовых задач.

## Содержание

1 Введение.....	5
2 Прохождение оптического излучения через оптические материалы .....	6
<b>2.1 Взаимодействие оптического излучения с веществом. Скорость света. Оптические константы среды .....</b>	<b>6</b>
2.1.1 Коэффициенты отражения и пропускания света.....	6
2.1.2 Примеры решения задач по теме «Взаимодействие оптического излучения с веществом. Скорость света. Оптические константы среды» 9	9
2.1.3 Задачи для самостоятельного решения.....	10
2.2 Поглощение света .....	11
2.2.1 Закон Бугера.....	11
2.2.2 Примеры решения задач по теме «Поглощение света» .....	13
2.2.3 Задачи для самостоятельного решения.....	14
2.3 Поглощение света с учетом многократного отражения .....	15
2.3.1 Задачи для самостоятельного решения.....	17
2.4 Отражение и преломление света на границе двух сред .....	19
2.4.1 Эффект полного внутреннего отражения как частный случай закона преломления.....	19
2.4.2 Примеры решения задач по теме «Эффект полного внутреннего отражения как частный случай закона преломления».....	21
2.4.3 Задачи для самостоятельного решения.....	23
2.5 Поляризация света. Формулы Френеля.....	24
2.5.1 Поляризация света. Формулы Френеля. Закон Брюстера.....	25
2.5.2 Примеры решения задач по теме «Поляризация света. Формулы Френеля» .....	26
2.5.3 Задачи для самостоятельного решения.....	29
3 Кристаллическое состояние вещества .....	30
3.1 Параметры кристаллической решетки.....	30
3.2 Примеры решения задач по теме «Кристаллическое состояние вещества» .....	31
3.3 Задачи для самостоятельного решения.....	31
4 Нелинейные оптические кристаллы.....	33
4.1 Поляризованность и плотность связанных зарядов. Поляризуемость. Диэлектрическая восприимчивость. ....	34

4.1.1	Примеры решения задач по теме «Поляризованность и плотность связанных зарядов. Поляризуемость. Нелинейные оптические кристаллы».....	36
4.1.2	Задачи для самостоятельного решения.....	37
5	Оптическое бесцветное неорганическое стекло. ....	40
5.1	Оптические постоянные бесцветного неорганического стекла. Диаграмма Аббе.....	40
5.2	Бесцветное оптическое стекло. Механические свойства бесцветного неорганического стекла. ....	43
5.2.1	Механические свойства бесцветного неорганического стекла .....	43
5.2.2	Задачи для самостоятельного решения.....	46
6	Органическое стекло.....	51
7	Стекла с особыми свойствами .....	51
7.1	Цветное оптическое стекло.....	51
7.1.1	Причины появления окраски стекол .....	51
7.1.2	Спектральная характеристика цветного стекла.....	52
7.1.3	Задачи для самостоятельного решения.....	52
7.2	Фотохромное стекло. Инфракрасное стекло. Стеклокристаллические материалы.....	53
8	Современные тенденции развития оптического материаловедения .....	53
	Рекомендуемая литература .....	54

## 1 Введение

Понятие "оптические материалы" охватывает сегодня огромное множество оптических сред, различающихся не только показателем преломления и коэффициентом дисперсии, но и прозрачностью для электромагнитного излучения требуемого диапазона длин волн, физико-механическими и физико-химическими свойствами. Оптические свойства твёрдых тел очень разнообразны. Металлы в основном имеют высокий коэффициент отражения света в видимой области спектра, много диэлектриков прозрачные, как, например, стекло. Часто цвет того или другого твёрдого тела обусловлен поглощающими свет примесями. Для полупроводников и диэлектриков характерна фотопроводимость – увеличение электропроводности при освещении. Важность исследования оптических свойств твердых тел заключается не только в большой информативности, точности и надежности оптических методов, но и в том, что они способствуют более глубокому пониманию фундаментальных свойств твердых тел.

В пособии содержится краткий обзор необходимых теоретических сведений, примеры решения типовых задач и задания для самостоятельного решения по дисциплине «Оптическое материаловедение».

Задачи для самостоятельного решения имеют целью дать возможность более глубокого понимания физической природы процессов поглощения, отражения и рассеяния света твердыми телами, самостоятельно приобрести необходимые навыки расчета оптических параметров твердых тел. Задачи, посвященные процессам взаимодействия оптического излучения с веществом, позволяют закрепить полученный на лекциях теоретический материал.

В ходе выполнения заданий студент должен:

– *знать*: основные закономерности взаимодействия оптического излучения с твердым телом, в том числе твердыми материалами пониженной размерности; их спектральные и поляризационные особенности; основные классы оптических материалов; принципы разработки новых оптических материалов.

– *уметь*: выбирать, адаптировать и модифицировать модели, описывающие оптические свойства твердых тел.

– *владеть*: навыками выбора методов расчета основных оптических характеристик твердых тел, обобщения и интерпретации полученных результатов.

## 2 Прохождение оптического излучения через оптические материалы

### 2.1 Взаимодействие оптического излучения с веществом. Скорость света. Оптические константы среды

Оптические свойства материалов являются результатом их взаимодействия с электромагнитным излучением.

**Цель** – научиться рассчитывать коэффициенты отражения и пропускания оптических материалов.

#### 2.1.1 Коэффициенты отражения и пропускания света

С потоком оптического излучения  $I_0$ , распространяющимся в любой среде могут происходить следующие количественные изменения:

1. Рассеяние части потока в результате отражения от частиц, имеющих показатель преломления, отличающийся от показателя преломления среды  $I_R$ .
2. Поглощение части потока излучения средой с преобразованием в другие виды энергии (тепло, генерация носителей тока, эмиссия электронов и ионов)  $I_A$ .
3. Пропускание части потока через среду  $I_T$ .

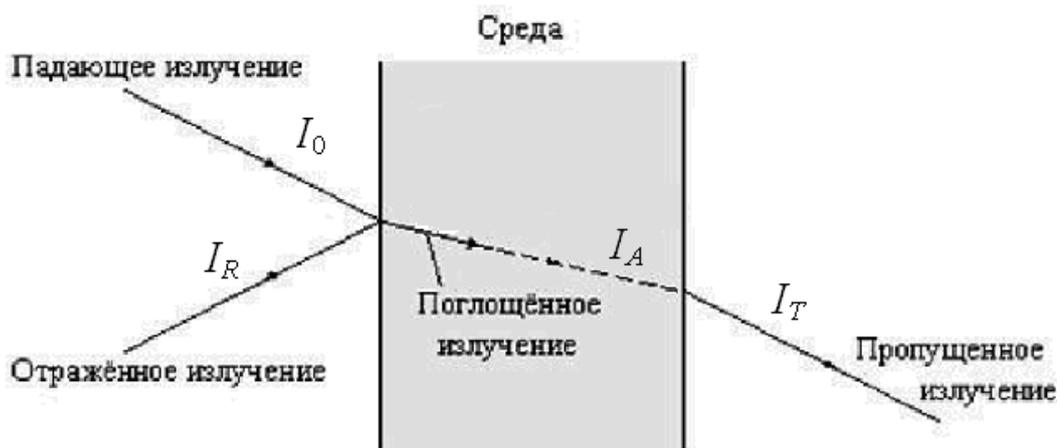


Рис. 2.1. Схема, иллюстрирующая оптические процессы, происходящие на поверхности среды и внутри неё

$I_0$  - падающий (исходный) поток оптического излучения;

$I_R$  - отраженный поток;

$I_{in}$  - поток, вошедший в пластину;

$I_T$  - поток, прошедший через пластину;

В отсутствии рассеяния излучения средой (оптически однородная среда) между падающим на среду светом с интенсивностью  $I_0$ , отраженным от поверхности  $I_R$ , поглощенным в среде светом с интенсивностью  $I_A$  и прошедшем потоком через среду светом с интенсивностью  $I_T$  сохраняется баланс:

$$I_0 = I_R + I_A + I_T. \quad (2.1)$$

Уравнение баланса (2.1) можно записать следующим образом:

$$1 = I_R / I_0 + I_A / I_0 + I_T / I_0 = R + A + T, \quad (2.2)$$

где  $R$ ,  $A$ ,  $T$ , характеризующие относительные доли отраженного, поглощенного и прошедшего потоков излучения, называются соответственно коэффициентами отражения, поглощения (интегральный или поглощательная способность) и пропускания.

До тех пор, пока ниже следующее рассмотрение ограничивается случаем монохроматического пучка, символ частоты как аргумента оптических функций опускается. Он снова вводится там, где существенным становится изменение обсуждаемых оптических функций с частотой.

$I_0$  - падающий (исходный) поток оптического излучения;

$I_R$  - отраженный поток;

$I_{in}$  - поток, вошедший в пластину;

$I_{out}$  - поток, прошедший через пластину;

$I'_R$  - поток, отраженный от второй (внутренней) поверхности пластины;

$I$  - вышедший из пластины поток.

Все эти потоки показаны на рис. 2.2.

б

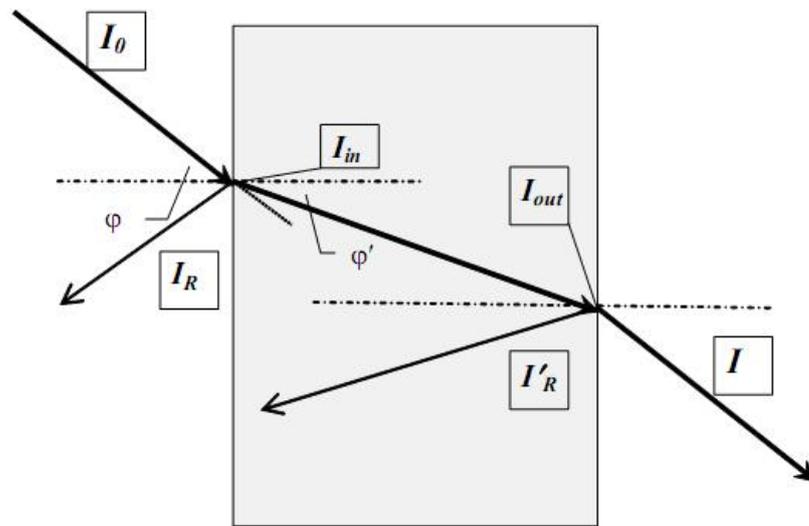


Рис. 2.2. Потоки излучения при прохождении монохроматического луча через пластину из этого материала.

Измеряемой опытным путем (или рассчитываемой) характеристикой одной поверхности материала является энергетический коэффициент внешнего отражения  $R$ :

$$R = I_R / I_0.$$

Соответственно  $I_R = I_0 \cdot R$  и  $I_{in} = I_0 - I_R = I_0 \cdot (1 - R)$

Характеристиками плоскопараллельной пластины является коэффициент внешнего пропускания  $T$ , измеряемый опытным путем,

$$T = I_T / I_0; \quad (2.3)$$

Пренебрегая многократным отражением потока  $I'_R$  внутри пластины, мы получаем

$$I = I_{out} - I'_R = I_{out} - I_{out} \cdot R = I_{out} \cdot (1-R).$$

Соответственно

$$T = I_{out} \cdot (1-R) / I_0. \quad (2.4)$$

Для плоскопараллельной пластины из полностью прозрачного (непоглощающего) материала ситуация существенно упрощается:

$$I_{out} = I_{in} = I_0 \cdot (1-R), I'_R = I_{out} \cdot R = I_0 \cdot (1-R) \cdot R$$

и

$$I = I_0 \cdot (1-R) - I_0 \cdot (1-R) \cdot R = I_0 \cdot (1-R)^2.$$

Соответственно

$$T = I / I_0 = (1-R)^2.$$

При нормальном падении световых лучей для слабо поглощающих сред спектральная зависимость коэффициента отражения (зависимость коэффициента отражения от длины волны) может быть рассчитана по известной формуле

$$R = \left( \frac{n-1}{n+1} \right)^2, \quad (2.5)$$

где  $n$  – показатель преломления кристалла.

Волна распространяется со скоростью распространения оптического излучения в веществе.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}},$$

где  $c$  - скорость света в вакууме. Общепринятые значения скорости света, электрической и магнитной постоянных в системе СИ приведены в таблице.

Символ	Имя	Численное значение	Единицы измерения в системе СИ	Тип размерности
$c$	Постоянная скорости света	$2.99792458 \times 10^8$	<u>м</u> / <u>с</u>	$L T^{-1}$
$\epsilon_0$	Электрическая постоянная	$8.854 \times 10^{-12}$	<u>Ф</u> / м	$L^{-3} M^{-1} T^4 I^2$
$\mu_0$	Магнитная постоянная	$1.2 \times 10^{-6}$	<u>Гн</u> / м	$L M T^{-2} I^{-2}$

$$n = \sqrt{\epsilon \mu}, \mu = 1 (\text{для немагнитных сред}) \Rightarrow n = \sqrt{\epsilon}.$$

### 2.1.2 Примеры решения задач по теме «Взаимодействие оптического излучения с веществом. Скорость света. Оптические константы среды»

**Задача 1.** Имеется  $m$  параллельных полупрозрачных плоскостей. Коэффициенты отражения и пропускания каждой из них равны  $R$  и  $T$ . Найти коэффициент отражения  $R_m$  и коэффициент пропускания  $T_m$  всей системы  $m$  плоскостей (относительно падающего света).

**Решение:**

$$I_{1R} = RI_0,$$

$$I_{1A} = (1-R) \cdot I_0, \text{ (в точке A),}$$

$$I_{1B} = (1-R) \cdot TI_0,$$

(в точке B, так как прошел через всю пластину 1),

$$I_{2R} = R \cdot (1-R) \cdot TI_0,$$

$$I_2 = I_{1B} - I_{2R} = (1-R)^2 \cdot T \cdot I_0,$$

(в точке C),

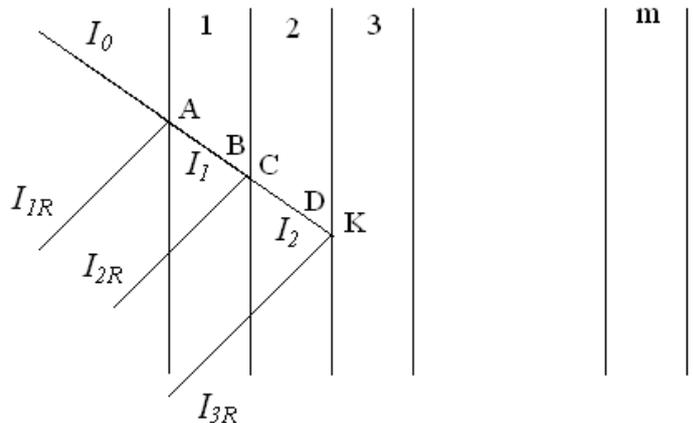
$$I_{3R} = R \cdot (1-R)^2 \cdot T^2 \cdot I_0 \text{ и т.д.}$$

$$I_{mR} = R \cdot (1-R)^{m-1} \cdot T^{m-1} \cdot I_0, \quad I_m = (1-R)^m \cdot$$

$$T^m \cdot I_0,$$

$$R_m = I_{mR} / I_0 = R \cdot (1-R)^{m-1} \cdot T^{m-1}, \quad T_m = I_m / I_0 = (1-R)^m T^m$$

$$\text{Ответ: } R_m = (1-R)^{m-1} T^{m-1} R, \quad T_m = (1-R)^m T^m.$$



**Задача 2.** При прохождении света через стеклянную пластину его интенсивность за счет отражения уменьшилась на 7,5%. Найти показатель преломления стекла. (Учесть отражение от обеих граней).

**Решение:**

Свет, вышедший из стеклянной пластины, определяется

$$I = (1-R)^2 I_0.$$

Интенсивность света уменьшилась на величину

$$I_0 - (1-R)^2 I_0,$$

$$(I_0 - (1-R)^2 I_0) / I_0 = 0,075,$$

$$R = 1 - \sqrt{1 - 0,075} = 0,038$$

$$R = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2}$$

$$n = \frac{1 + \sqrt{R}}{1 - \sqrt{R}} = 1,486.$$

**Задача 3.** Для многих прозрачных бесцветных веществ зависимость показателя преломления от длины волны света в вакууме может быть представлена выражением  $n = a + b/\lambda^2$ , где  $a = 1,502$  и  $b = 0,004563 \text{ мкм}^2$  – константы. На сколько уменьшается интенсивность света при прохождении света через такое вещество для длин волн инфракрасной части спектра  $\lambda_k = 980 \text{ нм}$  и фиолетовой части  $\lambda_\phi = 380 \text{ нм}$ . (Учесть отражение от обеих граней)

Решение:

$$\begin{array}{ll}
 a := 1.502 & b := 0.004563 \\
 \lambda_1 := 380 & l_2 := 980 \\
 n_1 := a + \frac{b \cdot 10^6}{\lambda_1^2} & n_1 = 1.534 \qquad n_2 := a + \frac{b \cdot 10^6}{l_2^2} \qquad n_2 = 1.507 \\
 R_1 := \frac{(n_1 - 1)^2}{(n_1 + 1)^2} & R_1 = 0.044 \qquad R_2 := \frac{(n_2 - 1)^2}{(n_2 + 1)^2} \qquad R_2 = 0.041 \\
 r_1 := 1 - (1 - R_1)^2 & r_1 = 0.087 \qquad r_2 := 1 - (1 - R_2)^2 \qquad r_2 = 0.08 \\
 8.7\% & 8\%
 \end{array}$$

### 2.1.3 Задачи для самостоятельного решения

- 2.1.1 Для некоторой длины волны света диэлектрическая проницаемость среды равна 2,323. Чему равен показатель преломления среды для этой длины волны?
- 2.1.2 Рассчитать коэффициент отражения света при нормальном падении на поверхность воды ( $n = 1,33$ ).
- 2.1.3 Рассчитать коэффициенты отражения и пропускания при нормальном падении света из воды ( $n_1 = 1,33$ ) на стекло ( $n_2 = 1,5$ ).
- 2.1.4 Скорость света в некоторой среде равна  $2,386 \times 10^8$  м/с. Рассчитать относительную диэлектрическую постоянную среды. Значение относительной магнитной проницаемости среды принять равной  $\mu = 1$ .
- 2.1.5 Монохроматический свет падает на две сложенные вместе стеклянные пластинки с показателями преломления  $n_1 = 1,5$  и  $n_2 = 1,8$ . Рассчитать на какую долю уменьшится интенсивность прошедшего света за счет отражения от пластин (многократное отражение не учитывать).
- 2.1.6 Интенсивность монохроматической световой волны, падающей на стеклянную пластинку с показателем преломления  $n = 1,5$ , равна  $300$  лм/м<sup>2</sup>. Рассчитать интенсивность отраженной волны. Учитывать отражение от двух границ раздела.
- 2.1.7 Рассчитать коэффициент пропускания при нормальном падении света из воздуха на стекло, показатель преломления которого равен  $n = 1,5$ .
- 2.1.8 На стеклянную плоскопараллельную пластину падает по нормали плоская монохроматическая световая волна интенсивности  $I_0 = 100$  лм/м<sup>2</sup>. Показатель преломления пластины  $n = 1,5$ , толщина пластины  $d = 10$  см. Длина когерентности волны намного меньше  $d$ . Рассчитать интенсивность света, прошедшего через пластинку, при условии, что поглощение в пластинке отсутствует.
- 2.1.9 На какую долю уменьшится интенсивность света при прохождении через стеклянную пластинку толщиной 4 мм за счет отражения?

Показатель преломления стекла  $n = 1,52$ . (Вторичными отражениями пренебречь).

- 2.1.10 Скорость света в некоторой среде равна  $2,386 \times 10^8$  м/с. Рассчитать относительную диэлектрическую постоянную среды. Значение относительной магнитной проницаемости среды принять равной  $\mu = 1$ .
- 2.1.11 Монохроматический свет падает на две сложенные вместе стеклянные пластинки с показателями преломления  $n_1 = 1,5$  и  $n_2 = 1,8$ . Рассчитать на какую долю уменьшится интенсивность прошедшего света за счет отражения от пластин (многократное отражение не учитывать).
- 2.1.12 Рассчитать коэффициенты отражения и пропускания при нормальном падении света из воды ( $n_1 = 1,33$ ) на стекло ( $n_2 = 1,5$ ).
- 2.1.13 Интенсивность монохроматической световой волны, падающей на стеклянную пластинку с показателем преломления  $n = 1,5$ , равна  $300$  лм/м<sup>2</sup>. Рассчитать интенсивность отраженной волны. Учитывать отражение от двух границ раздела.
- 2.1.14 Для некоторой длины волны света диэлектрическая проницаемость среды равна  $2,323$ . Чему равен коэффициент отражения среды для этой длины волны при нормальном падении света?
- 2.1.15 Для многих прозрачных бесцветных веществ зависимость показателя преломления от длины волны света в вакууме может быть представлена выражением  $n = a + b/l^2$ , где  $a = 1,502$  и  $b = 0,004563$  мкм<sup>2</sup> – константы. Рассчитать показатели преломления для длин волн красной части видимого спектра  $l_k = 780$  нм и фиолетовой части  $l_\phi = 380$  нм.
- 2.1.16 Рассчитать относительную диэлектрическую постоянную среды, в которой скорость света равна  $1,945 \times 10^8$  м/с. Значение относительной магнитной проницаемости среды принять равной  $\mu = 1$ .
- 2.1.17 Скорость света в некоторой среде равна  $2,386 \times 10^8$  м/с. Рассчитать относительную диэлектрическую постоянную среды. Значение относительной магнитной проницаемости среды принять равной  $\mu = 1$ .

## 2.2 Поглощение света

Поглощение света – это явление уменьшения интенсивности света при прохождении его через вещество. Уменьшение интенсивности света происходит в результате того, что энергия света переходит в другие виды энергии: энергию активизации, ионизации молекул, энергию теплового хаотического движения частиц в веществе и др.

**Цель** – научиться рассчитывать коэффициент поглощения и интенсивность прошедшего через образец света с учетом закона Бугера.

### 2.2.1 Закон Бугера

Свет, проникая в кристалл, вступает с кристаллической решеткой во взаимодействие, связанное с обменом энергией. Обозначим через  $I$

интенсивность света, т.е. количество световой энергии, проходящей в единицу времени через нормальное к световому потоку единичное сечение кристалла. Часть светового потока отражается от границы раздела. Доля отраженной энергии характеризуется коэффициентом отражения

$$R = \frac{I_R}{I_0}.$$

Пусть параллельный пучок излучения распространяется в поглощающей и рассеивающей среде. Интенсивность света, проходящего через кристалл, ослабляется вследствие процесса поглощения. Найдем закон изменения интенсивности излучения вдоль направления его распространения  $x$ . Выделим на глубине  $x$  от поверхности кристалла бесконечно тонкий слой  $dx$  (рис.2.3). Количество световой энергии  $dI$ , поглощенное слоем  $dx$ , пропорционально интенсивности света, падающего на этот слой  $I$ , и его толщине  $dx$ , тогда скорость убывания интенсивности излучения  $dI/dx$  пропорциональна самой интенсивности  $I$ . Считаем, что при  $x = 0$  интенсивность излучения равна начальной, т.е.  $I(0) = I_0$ . Тогда получаем следующее дифференциальное уравнение

$$\frac{dI}{dx} = -kI \quad (2.6)$$

Знак минус указывает на убыль энергии. Интегрируя уравнение (1.6), имеем

$$\begin{aligned} \frac{dI}{I} &= -kdx, \\ \ln I &= -kx + \ln C, \text{ и далее} \\ I &= Ce^{-kx}. \end{aligned} \quad (2.7)$$

Используя начальное условие  $I(0) = I_0$ , найдем константу интегрирования  $C$ , которая равна  $C = I_0$ . Тогда уравнение (2.7) принимает вид

$$I = I_0 e^{-kx}. \quad (2.8)$$

В уравнении (2.8) коэффициент  $k$  имеет размерность, обратную длине, и носит название линейного коэффициента поглощения. Как видно из уравнения (2.8) коэффициент поглощения – это величина, равная обратной величине толщины пластинки, при которой интенсивность света ослабляется в  $e$  раз (рис.2.4).

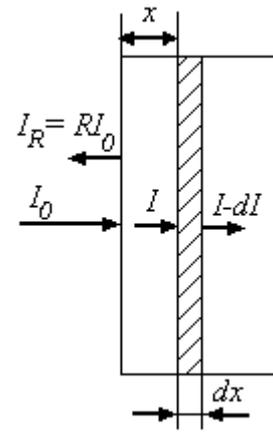


Рис. 2.3. Поглощение света в кристалле

Однако, уравнение (2.8) описывает лишь частный случай. Если отражением света пренебречь нельзя, то пользоваться формулой (2.8) вычисления спектра поглощения недопустимо. При наличии отражения плотность энергии волны в материале будет равна  $I_0(1-R)$ .

За счет поглощения на расстоянии  $d$  плотность энергии уменьшится в  $\exp(\alpha d)$  раз и в точке В будет равна  $I_0(1-R)\exp(-kd)$ , а плотность энергии вышедшего из образца света равна  $I = I_0(1-R)\exp(-kd)(1-R)$ , где последний множитель учитывает отражение света на второй границе раздела сред.

Таким образом, получаем для коэффициента пропускания

$$T = \frac{I}{I_0} = (1-R)^2 \exp(-kd). \quad (2.9)$$

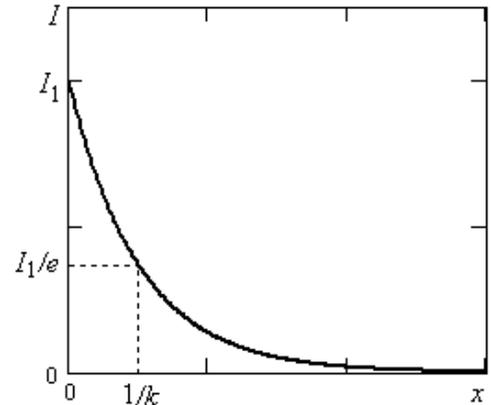


Рис. 2.4. Зависимость интенсивности прошедшего через образец света от толщины кристалла

### 2.2.2 Примеры решения задач по теме «Поглощение света»

**Задача 1.** Имеется прозрачная пластина толщиной  $d = 10$  см. Для некоторой длины волны коэффициент поглощения пластины изменяется линейно от значения  $k_1 = 0,8 \text{ м}^{-1}$  у одной поверхности, до  $k_2 = 1,2 \text{ м}^{-1}$  у другой поверхности. Определить (в процентах) ослабление интенсивности света при прохождении им толщины пластины.

*Решение:*

$$k = ax + b, \quad b = 0,8, \quad a = 4$$

(находятся из условий задачи)

$$dI = I(ax + b)dx,$$

$$\ln I_0 - \ln I = (2x^2 + 0,8x)|_0^{0,1} = 0,1$$

$$I/I_0 = 0,905$$

$$\text{Ослабление} = 1 - 0,905 = 0,095 \text{ или } 9,5\%.$$

(Ответ: 0,095 или 9,5 %).

**Задача 2.** Интенсивность монохроматической волны, прошедшей через прозрачную пластинку толщиной 10 см, уменьшилась на 20%. Определить коэффициент поглощения.

*Решение:*

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-kd) = 0,8,$$

$$k = -\frac{\ln 0,8}{d},$$

$$k = -\frac{\ln 0,8}{0,1} = 2,23 \text{ м}^{-1}.$$

### 2.2.3 Задачи для самостоятельного решения

- 2.2.1 На сколько процентов уменьшится интенсивность света, прошедшего через стеклянную пластинку толщиной 4 мм, с учетом поглощения и отражения? Коэффициент поглощения  $k = 1,2 \text{ м}^{-1}$  и показатель преломления стекла  $n = 1,52$ .
- 2.2.2 На стеклянную плоскопараллельную пластину толщиной  $d = 10 \text{ см}$  падает по нормали плоская монохроматическая световая волна интенсивности  $I_0 = 100 \text{ лм/м}^2$ . Длина когерентности волны намного меньше  $d$ . Интенсивность света, прошедшего через пластинку, при условии, что поглощение в пластинке отсутствует равна  $I = 92,2 \text{ лм/м}^2$ . Чему равен показатель преломления пластины?
- 2.2.3 При прохождении в некотором веществе пути  $L$  интенсивность света уменьшается в два раза, за счет поглощения. Во сколько раз уменьшится интенсивность света при прохождении пути  $3L$ ?
- 2.2.4 В некоторой среде распространяется плоская монохроматическая волна. Коэффициент поглощения среды  $k = 1 \text{ м}^{-1}$ . На сколько процентов уменьшится интенсивность света при прохождении волной пути, равного: а) 5мм; б) 4,6 м?
- 2.2.5 Имеется прозрачная пластина толщиной  $d = 10 \text{ см}$ . Для некоторой длины волны коэффициент поглощения пластины изменяется линейно от значения  $k_1 = 0,8 \text{ м}^{-1}$  у одной поверхности, до  $k_2 = 1,2 \text{ м}^{-1}$  у другой поверхности. Определить (в процентах) ослабление интенсивности света при прохождении им толщи пластины.
- 2.2.6 На стеклянную плоскопараллельную пластину падает по нормали плоская монохроматическая световая волна интенсивности  $I_0 = 100 \text{ лм/м}^2$ . Показатель преломления пластины  $n = 1,5$ , коэффициент поглощения  $k = 1,0 \text{ м}^{-1}$ . Толщина пластины  $d = 10 \text{ см}$ . Длина когерентности волны намного меньше  $d$ . Определить интенсивность света, прошедшего через пластинку, с учетом отражения от двух границ раздела.
- 2.2.7 На стеклянную плоскопараллельную пластину падает по нормали плоская монохроматическая световая волна интенсивности  $I_0 = 100 \text{ лм/м}^2$ . Показатель преломления пластины  $n = 1,5$ , коэффициент поглощения  $k = 1,0 \text{ м}^{-1}$ . Толщина пластины  $d = 10 \text{ см}$ . Длина когерентности волны намного меньше  $d$ . Определить интенсивность света, прошедшего через пластинку, с учетом отражений только от первой границы раздела.
- 2.2.8 При прохождении монохроматического света через 10 % раствор глюкозы интенсивность света составила  $0,29 I_0$ . Определить толщину столба раствора, если  $k = 1,7 \text{ м}^{-1}$ . Отражение не учитывать.
- 2.2.9 На сколько процентов уменьшается интенсивность света при прохождении им оконного стекла толщиной 4 мм за счет поглощения? Коэффициент поглощения равен  $1,23 \text{ м}^{-1}$ .
- 2.2.10 Во сколько раз уменьшение интенсивности света при прохождении через стеклянную пластинку толщиной  $d = 2 \text{ мм}$  за счет отражения

- превосходит уменьшение интенсивности за счет поглощения, если показатель преломления  $n = 1,5$  и коэффициент поглощения  $k = 1,2 \text{ м}^{-1}$ ?
- 2.2.11 На сколько процентов уменьшится интенсивность света, прошедшего через стеклянную пластинку толщиной 4 мм, с учетом поглощения и отражения? Коэффициент поглощения  $k = 1,2 \text{ м}^{-1}$  и показатель преломления стекла  $n = 1,52$ .
- 2.2.12 Стеклянная пластина толщиной  $d = 3,82$  мм, пропускает 88,2 % упавшего на нее света. Определить коэффициент поглощения стекла для данной длины волны.
- 2.2.13 Коэффициент поглощения монохроматического света длиной волны 600 нм для некоторой среды равен  $k = 1,25 \text{ м}^{-1}$ . Определить коэффициент поглощения этой среды для света с длиной волны 400 нм.
- 2.2.14 На стеклянную плоскопараллельную пластину падает по нормали плоская монохроматическая световая волна интенсивности  $I_0 = 200 \text{ лм/м}^2$ . Коэффициент поглощения стекла  $k = 1,0 \text{ м}^{-1}$ . Толщина пластины  $d = 5$  см. Определить интенсивность света, прошедшего через пластинку, если отражение отсутствует.
- 2.2.15 Монохроматический свет нормально падает на две сложенные вместе стеклянные пластинки толщиной соответственно  $x_1 = 1$  см и  $x_2 = 1,5$  см, имеющие коэффициенты поглощения  $k_1 = 1,5 \text{ м}^{-1}$  и  $k_2 = 1,8 \text{ м}^{-1}$  соответственно. Определить на какую долю уменьшится интенсивность прошедшего света за счет поглощения.
- 2.2.16 Интенсивность монохроматической волны прошедшей через прозрачную пластинку толщиной 10 см уменьшилась на 20 %. Определить коэффициент поглощения.
- 2.2.17 Во сколько раз коэффициент поглощения синего света ( $l_c = 460$  нм) больше коэффициента поглощения красного света ( $l_k = 650$  нм) для одного и того же вещества?
- 2.2.18 Световой поток одновременно проходит через два поглощающих раствора сахара и одинаково ослабляется в них. Один раствор имеет толщину 2 см и концентрацию 10 %, второй раствор имеет толщину 5 см. Определить концентрацию второго раствора.
- 2.2.19 При прохождении белого света через некоторую среду толщиной 1 см интенсивность синего света ( $l_c = 400$  нм) оказалась равна интенсивности красного света ( $l_k = 600$  нм). Определить константу поглощения данной среды, если в падающем потоке интенсивность синего света была в два раза больше интенсивности красного света.

### 2.3 Поглощение света с учетом многократного отражения

Если толщина образца в направлении распространения света много меньше эффективной глубины проникновения света, то необходимо учитывать многократное отражение света на границах раздела воздух-образец.

**Цель** – научиться рассчитывать коэффициент поглощения с учетом многократного отражения света на границах раздела воздух-образец.

Для вывода формулы с учетом многократного отражения света внутри образца обратимся к схеме на рис. 3.1. Обозначим плотности потоков квантов луча у передней и задней грани соответственно через  $P'$  и  $P''$ , а  $P_1, P_2, P_3, \dots$  – плотности потоков квантов вышедших из образца лучей 1, 2, 3, ... . Тогда

$$P'_A = P_0(1-R), \quad P''_B = P_0(1-R)\exp(-kd);$$

В точку  $C$  придет поток света, отраженный от точки  $B$ , т.е.

$$P'_C = P''_B R = P_0(1-R) \cdot R \cdot \exp(-kd),$$

а отраженный в точке  $C$  и поглощенный на расстоянии  $d$  поток будет равен

$$P''_C = P'_C \exp(-kd) = P_0(1-R) \cdot R \cdot \exp(-2kd); \text{ и т.д.}$$

$$P'_D = P'_C R = P_0(1-R) \cdot R^2 \cdot \exp(-2kd),$$

$$P''_D = P'_D \exp(-kd) = P_0(1-R) \cdot R^2 \cdot \exp(-3kd);$$

$$P_1 = P''_D (1-R) = P_0(1-R)^2 \exp(-kd);$$

$$P_2 = P''_D (1-R) = P_0(1-R)^2 \cdot R^2 \cdot \exp(-3kd).$$

Таким же образом, выражая  $P'_E, P''_E, P'_F, P''_F$ , получим

$$P_3 = P_0(1-R)R^4 \cdot \exp(-5kd) \text{ и т.д.}$$

Сравнивая величины  $P_1, P_2, P_3$ , видим, что имеем геометрическую прогрессию  $(a_1, a_2, a_3)$ , знаменателем которой является  $q = R^2 \cdot \exp(-2kd)$ . Воспользовавшись формулой суммы  $m$ -членов геометрической прогрессии  $S = (a_1 - a_m \cdot q) / (1 - q)$ , получим для плотности потока энергии прошедшего через образец луча следующее выражение:

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_m = \frac{P_0(1-R)^2 \exp(-kd)}{1 - R^2 \exp(-2kd)} \cdot (1 - R^{2m} \exp(-2kdm)).$$

При больших значениях  $m$  величина  $R^{2m} \exp(-2kdm) \ll 1$ , тогда

$$P = P_0 \frac{(1-R)^2 \exp(-kd)}{1 - R^2 \exp(-2kd)},$$

и получаем окончательное выражение

$$T = \frac{(1-R)^2 \exp(-kd)}{1 - R^2 \exp(-2kd)}. \quad (2.10)$$

Учет интерференции лучей в образце приводит к еще более сложному выражению для спектра пропускания. При нестрогой монохроматичности излучения для образцов, толщины которых велики по сравнению с длиной волны излучения, интерференцию можно не учитывать и при расчете спектров поглощения пользоваться формулой (2.9).

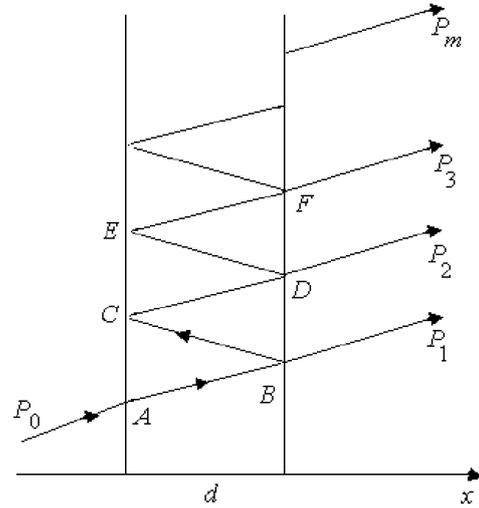


Рис. 2.5. Схема к выводу формулы (2.10)

### 2.3.1 Задачи для самостоятельного решения

2.3.1 Используя выражение (2.10) найти явное выражение для коэффициента поглощения.

2.3.2 В исходном состоянии коэффициент пропускания для кристалла силиката висмута  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  толщиной 0,75 мм на длине волны 450 нм равен 16,1 %, а на длине волны 580 нм он равен 65,3 %. После отжига в вакууме коэффициент пропускания имел величину 15,3 % на длине волны 450 нм и 63,9 % на длине волны 580 нм. Чему равно абсолютное и относительное изменение коэффициента поглощения в кристалле  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  после отжига в вакууме на указанных длинах волн? Показатель преломления в спектральном диапазоне от 460 до 900 нм для кристаллов  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  рассчитывается по формуле Зелльмейера

$$n^2(\lambda) = A + \frac{B\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_0^2} + \frac{C\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_f^2}, \text{ где для } \text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20} \text{ ее параметры имеют}$$

значения:  $A = 2,4010$ ;  $B = 3,2698$ ;  $C = 7,76 \cdot 10^{-2}$ ;  $\lambda_0 = 250$  нм;  $\lambda_f = 380$  нм.

2.3.3 В исходном состоянии коэффициент пропускания для кристалла титаната висмута  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca}, \text{Ga}$  толщиной 8,9 мм на длине волны 520 нм равен 30,7 %, а на длине волны 650 нм он равен 40,6 %. После облучения кристалла светом с длиной волны 532 нм коэффициент пропускания имел величину 28,2 % на длине волны 520 нм и 45,6 % на длине волны 650 нм. Чему равно абсолютное и относительное изменение коэффициента поглощения в кристалле  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca}, \text{Ga}$  после облучения на указанных длинах волн? Коэффициент отражения для кристаллов  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$  рассчитывается по эмпирической формуле

$$R = C_0 + \frac{C_5}{\lambda^5} + \frac{C_4}{\lambda^4} + \frac{C_3}{\lambda^3} + \frac{C_2}{\lambda^2} + \frac{C_1}{\lambda} \text{ (в этой формуле длина волны подставляется}$$

в нм), где для  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$  ее параметры имеют значения:  $C_0 = 0,199094255$ ,  $C_1 = -38,345115881$ ,  $C_2 = 21241,53311$ ,  $C_3 = 88,70185714$ ,  $C_4 = 1,265004055$ ,  $C_5 = 0,99992933$ .

2.3.4 В исходном состоянии коэффициент пропускания для кристалла германата висмута  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  толщиной 1,8 мм на длине волны 460 нм равен 24,3 %, а на длине волны 540 нм он равен 60,4 %. После отжига в вакууме коэффициент пропускания имел величину 16,2 % на длине волны 460 нм и 55,4 % на длине волны 540 нм. Чему равно абсолютное и относительное изменение коэффициента поглощения в кристалле  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  после отжига в вакууме на указанных длинах волн? Показатель преломления в спектральном диапазоне от 460 до 900 нм для кристаллов  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  рассчитывается по формуле Зелльмейера

$$n^2(\lambda) = A + \frac{B\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_0^2} + \frac{C\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_f^2}, \text{ где для } \text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20} \text{ ее параметры имеют}$$

значения:  $A = 2,286$ ;  $B = 3,4243$ ;  $C = 8,36 \cdot 10^{-2}$ ;  $\lambda_0 = 250$  нм;  $\lambda_f = 380$  нм.

2.3.5 В исходном состоянии коэффициент пропускания для кристалла силиката висмута  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  толщиной 10,7 мм на длине волны 550 нм

равен 29,59 %, а на длине волны 630 нм он равен 47,23 %. После ИК облучения коэффициент пропускания имел величину 32,73 % на длине волны 550 нм и 51,19 % на длине волны 630 нм. Чему равно абсолютное и относительное изменение коэффициента поглощения в кристалле  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  после ИК облучения на указанных длинах волн? Показатель преломления в спектральном диапазоне от 460 до 900 нм для кристаллов  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  рассчитывается по формуле Зелльмейера  $n^2(\lambda) = A + \frac{B\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_0^2} + \frac{C\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_f^2}$ , где для  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  ее параметры имеют значения:  $A = 2,4010$ ;  $B = 3,2698$ ;  $C = 7,76 \cdot 10^{-2}$ ;  $\lambda_0 = 250$  нм;  $\lambda_f = 380$  нм.

2.3.6 В исходном состоянии коэффициент пропускания для кристалла германата висмута  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  толщиной 1,8 мм на длине волны 490 нм равен 45,57 %, а на длине волны 580 нм он равен 63,85 %. После облучения светом с длиной волны 870 нм коэффициент пропускания имел величину 45,18 % на длине волны 490 нм и 65,10 % на длине волны 580 нм. Чему равно абсолютное и относительное изменение коэффициента поглощения в кристалле  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  после его облучения на указанных длинах волн? Показатель преломления в спектральном диапазоне от 460 до 900 нм для кристаллов  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  рассчитывается по формуле Зелльмейера  $n^2(\lambda) = A + \frac{B\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_0^2} + \frac{C\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_f^2}$ , где для  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  ее параметры имеют значения:  $A = 2,286$ ;  $B = 3,4243$ ;  $C = 8,36 \cdot 10^{-2}$ ;  $\lambda_0 = 250$  нм;  $\lambda_f = 380$  нм.

2.3.7 В исходном состоянии коэффициент пропускания для кристалла силиката висмута  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  толщиной 2,9 мм на длине волны 520 нм равен 40,5 %, а на длине волны 680 нм он равен 63,8 %. После отжига в воздушной атмосфере коэффициент пропускания имел величину 41,5 % на длине волны 520 нм и 65,3 % на длине волны 680 нм. Чему равно абсолютное и относительное изменение коэффициента поглощения в кристалле  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  после отжига в воздушной атмосфере на указанных длинах волн? Показатель преломления в спектральном диапазоне от 460 до 900 нм для кристаллов  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  рассчитывается по формуле Зелльмейера  $n^2(\lambda) = A + \frac{B\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_0^2} + \frac{C\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_f^2}$ , где для  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  ее параметры имеют значения:  $A = 2,4010$ ;  $B = 3,2698$ ;  $C = 7,76 \cdot 10^{-2}$ ;  $\lambda_0 = 250$  нм;  $\lambda_f = 380$  нм.

2.3.8 В исходном состоянии коэффициент пропускания для кристалла титаната висмута  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Al}$  толщиной 6,6 мм на длине волны 500 нм равен 18,7 %, а на длине волны 700 нм он равен 55,3 %. После облучения кристалла светом с длиной волны 660 нм коэффициент пропускания имел величину 23,0 % на длине волны 500 нм и 62,2 % на

длине волны 700 нм. Чему равно абсолютное и относительное изменение коэффициента поглощения в кристалле  $\text{Вi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Al}$  после облучения на указанных длинах волн? Коэффициент отражения для кристаллов  $\text{Вi}_{12}\text{TiO}_{20}$  рассчитывается по эмпирической формуле  $R = C_0 + \frac{C_5}{\lambda^5} + \frac{C_4}{\lambda^4} + \frac{C_3}{\lambda^3} + \frac{C_2}{\lambda^2} + \frac{C_1}{\lambda}$  (в этой формуле длина волны подставляется в нм), где для  $\text{Вi}_{12}\text{TiO}_{20}$  ее параметры имеют значения:  $C_0 = 0,199094255$ ,  $C_1 = -38,345115881$ ,  $C_2 = 21241,53311$ ,  $C_3 = 88,70185714$ ,  $C_4 = 1,265004055$ ,  $C_5 = 0,99992933$ .

## 2.4 Отражение и преломление света на границе двух сред

Полное внутреннее отражение – внутреннее отражение, при условии, что угол падения превосходит некоторый критический угол. При этом падающая волна отражается полностью, и значение коэффициента отражения превосходит его самые большие значения для полированных поверхностей. Коэффициент отражения при полном внутреннем отражении не зависит от длины волны.

В оптике это явление наблюдается для широкого спектра электромагнитного излучения, включая рентгеновский диапазон.

**Цель** – научиться проводить расчеты оптических констант материала при полном внутреннем отражении света.

### 2.4.1 Эффект полного внутреннего отражения как частный случай закона преломления

В однородной среде свет распространяется прямолинейно с постоянной скоростью. Если же среда неоднородна, то в разных областях скорость его распространения различна и прямолинейность световых лучей нарушается.

Простейшей неоднородностью является плоская граница раздела двух безграничных однородных сред, в которых свет распространяется со скоростями, равными соответственно  $v_1$  и  $v_2$ . На рис. 2.6. показано, что луч **I**, падающий из первой среды под углом  $i$  к перпендикуляру, на границе раздела раздваивается на отраженный луч **II**, идущий в первой среде с той же скоростью  $v_1$ , и преломленный луч **III**, распространяющийся во второй среде под углом  $r$  к тому же перпендикуляру.

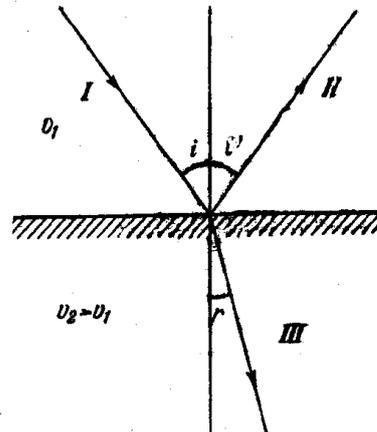


Рисунок 2.6

Взаимное геометрическое расположение этих лучей определяется тремя законами Снеллиуса-Декарта.

1. Угол падения равен углу отражения:

$$i = i' \quad (2.11)$$

2. Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \text{const} \quad (2.12)$$

3. Луч падающий, луч отраженный и луч преломленный лежат в одной плоскости с перпендикуляром, восстановленным к границе раздела в точке падения.

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n_{12} \quad (2.13)$$

где  $n_{12}$  – постоянная величина, называется относительным показателем или коэффициентом преломления второй среды относительно первой.

Показатель преломления среды относительно вакуума называется абсолютным показателем преломления этой среды. Относительный показатель преломления  $n_{12}$  выражается через абсолютные показатели преломления  $n_1$  и  $n_2$  соотношением:

$$n_{12} = n_2 / n_1 \quad (2.14)$$

С учетом соотношения (2.14) закон преломления можно записать в симметричной форме:

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r \quad (2.15)$$

Из этой симметрии следует обратимость световых лучей. Если обратить направление луча III на рис. 2.6. и заставить его падать под тем же углом  $r$  на границу, раздела, то преломленный луч будет распространяться в первой среде под углом  $i$  т. е, пойдет обратно вдоль луча I.

Уравнение (2.13) может охватить и закон отражения. Поскольку отраженный луч II распространяется в той же самой первой среде, но по другую сторону перпендикуляра, то для него можно формально положить показатель преломления  $n = -n_1$ . Подставляя  $-n_1$  в равенство (2.15), получаем:  $\sin i = -\sin i'$ ,  $i = -i'$ .

Для прозрачных сред падающий на границу раздела лучистый поток при переходе света из среды с большим показателем преломления  $n_1$  (оптически более плотной) в среду с меньшим показателем  $n_2$  (оптически менее плотную), угол падения может достичь некоторого предельного значения  $i_{\text{пред}}$ , при котором преломленный луч направлен вдоль границы раздела сред, согласно (2.15):

$$n_1 \sin i_{\text{пред}} = n_2 \sin 90^\circ \rightarrow \sin i_{\text{пред}} = n_2 / n_1.$$

Следовательно, при  $i > i_{\text{пред}}$  преломление прекращается и остается лишь отраженный луч (рис. 2.7) Это явление носит название *п о л н о г о* *в н у т р е н н е г о* *о т р а ж е н и я*.

Вся энергия света, падающего на границу раздела, при этом полностью отражается обратно в первую среду.

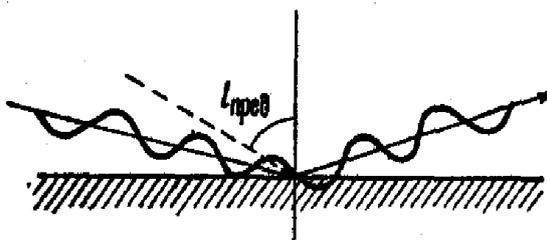


Рисунок 2.7

*Предельный угол полного внутреннего отражения* – это угол, при падении под которым преломленный луч пойдет вдоль границы раздела двух сред, теоретически даже не проникая ни в одну из них.

Однако полное внутреннее отражение – это не просто любопытный фокус, а основа для целого ряда важных современных технологий; прежде всего – этот эффект лежит в основе оптоволоконной связи. Свет, поступая с одного конца в тончайшее стекловолокно под очень большим углом, в дальнейшем вынужден распространяться вдоль этого волокна, не покидая его пределов, раз за разом отражаясь от его стенок, поскольку угол его падения не достаточен, чтобы вырваться за его пределы, благодаря чему на противоположном конце выход оптического сигнала практически не теряет в интенсивности. Если связать множество таких оптических волокон в пучок, чередование импульсов света и затемненных промежутков на выходе из такого оптоволоконного кабеля будет строго соответствовать сигналу, поступившему в него на входе. Этот принцип сегодня широко используется в современных медицинских технологиях (в частности, в артроскопии), когда тонкий пучок оптических волокон вводится в организм пациента сквозь крохотный надрез или естественное устье и доставляется буквально к самому органу, на котором производится микрохирургическая операция, позволяя хирургу в буквальном смысле видеть на экране монитора, что и как именно он оперирует.

Не менее широкое применение нашло полное внутреннее отражение и в области высокоскоростной передачи информации по оптоволоконным телефонным линиям связи. Посылая модулированные оптические сигналы вместо электромагнитных, мы получаем возможность на несколько порядков ускорить передачу информации по телекоммуникационным сетям. На самом деле, во всех по-настоящему индустриально развитых странах мира вся телефония уже переведена на оптоволоконную связь.

#### **2.4.2 Примеры решения задач по теме «Эффект полного внутреннего отражения как частный случай закона преломления»**

*Задача 1.* Определить угол полного внутреннего отражения на границе раздела сред стекло – воздух.

*Решение.*

Показатель преломления для стекла  $n_1 = 1,5163$ , для воздуха –  $n_2 = 1$ .

Следовательно, угол полного внутреннего отражения равен

$$i_{\text{пред}} = \arcsin n_2 / n_1 \approx 41^\circ 16'.$$

*Ответ:* Полное внутреннее отражение будет наступать при углах, больших чем  $41^\circ 16'$ .

*Задача 2.* Показатель преломления первой среды  $n_1=2$ . Синус угла полного внутреннего отражения 0,71. Определить показатель преломления второй среды.

*Решение.*

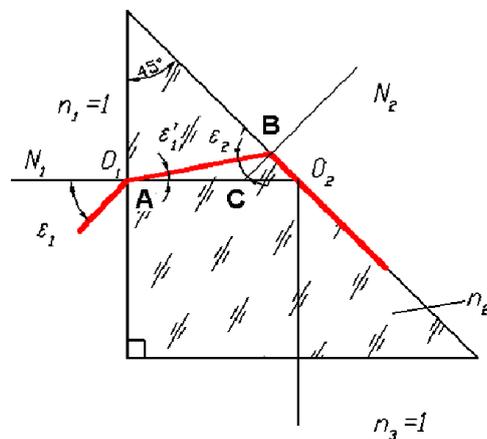
По соотношениям для угла полного внутреннего отражения

$$n_1 \sin i_{\text{пред}} = n_2.$$

Таким образом,  $n_2=0,71 \cdot 2=1,42$ .

*Ответ:* Показатель преломления второй среды  $n_2=1,42$ .

*Задача 3.* Определить в градусах и минутах предельный угол падения лучей  $\varepsilon_1$  на входную грань прямоугольной равнобедренной призмы, при котором отражающая грань может быть еще без зеркального покрытия. Призма изготовлена из стекла  $n_2=1,52$  и находится в воздухе.



*Решение.*

Определяем предельный угол полного внутреннего отражения на границе раздела стекло – воздух. По закону преломления

$$n_2 \sin \varepsilon_2 = n_3 \sin 90^\circ,$$

$$\varepsilon_2 = 41^\circ 16'. \quad \varepsilon_2 = 41,16 \text{ или } \varepsilon_2 = 41^\circ 10'.$$

Из треугольника ABC определяем угол  $\varepsilon_1$ .

Внешний угол треугольника ABC равен  $45^\circ$  (угол между нормалью равен углу между сторонами треугольника, как углы со взаимно перпендикулярными сторонами). Внешний угол треугольника равен сумме углов, не прилежащих к вершине, отсюда:

$$\varepsilon_1' + \varepsilon_2 = 45^\circ, \text{ следовательно, } \varepsilon_1' = 3^\circ 44'. \quad \varepsilon_1' = 3,84 \text{ или } \varepsilon_1' = 3^\circ 50'.$$

Применим закон преломления к первой поверхности призмы и определим угол  $\varepsilon_1$ .

$$n_1 \sin \varepsilon_1 = n_2 \sin \varepsilon_1';$$

$$\sin \varepsilon_1 = 1,5163 \cdot \sin(3^\circ 44'), \quad \varepsilon_1 = 5^\circ 40'. \quad \sin \varepsilon_1 = 1,52 \cdot \sin(3^\circ 50'), \quad \varepsilon_1 = 5^\circ 50'.$$

Ответ:  $\varepsilon_1 = 5^\circ 50'$ .

**Задача 4.** Объект, находящийся в воде, виден под углом  $60^\circ$ . Определить угол наклона преломленного луча в воде, если показатель преломления  $n = 1,33$ .

*Решение.*

Под углом  $\varepsilon_1 = 60^\circ$  мы наблюдаем мнимое изображение объекта.

Применим закон преломления и найдем реальный угол  $\varepsilon_1$ , под которым объект находится в воде.

Угол, под которым виден объект - это угол мнимый, а реально это угол, под которым мы смотрим на объект. Таким образом, нам даны  $\varepsilon_1$  и  $n$ .

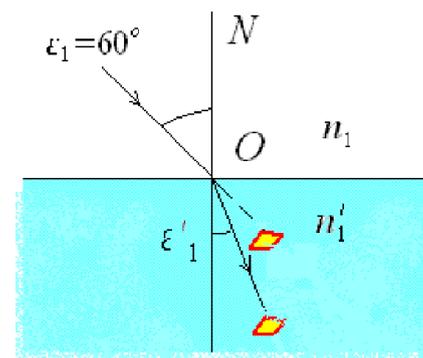
По закону преломления:  $n \sin \varepsilon = n' \sin \varepsilon'$

$$\sin \varepsilon_1' = \frac{\sin \varepsilon}{n};$$

$$\sin \varepsilon_1' = \frac{\sin 60^\circ}{1,33} = 0,709.$$

Преломленный угол  $\varepsilon_1'$  равен  $40^\circ 30'$ .

Ответ: Угол  $\varepsilon_1' = 40^\circ 30'$ .



### 2.4.3 Задачи для самостоятельного решения

- 2.4.1. На кварцевую пластинку, имеющую показатель преломления 1.54, падает световой луч. Чему равен угол падения, если отраженный и преломленный лучи взаимно перпендикулярны?
- 2.4.2. Луч падает под углом  $60^\circ$  на стеклянную пластинку толщиной 3 см. Определить боковое смещение луча после выхода из пластинки.
- 2.4.3. Предельный угол полного внутреннего отражения для бензола  $\alpha = 42^\circ$ . Определить скорость света в бензоле.
- 2.4.4. Свет падает на входную грань прямоугольной равнобедренной призмы под углом  $7^\circ$ . Призма изготовлена из стекла с показателем преломления  $n_2 = 1,55$  и находится в воздухе. Может ли в этом случае происходить полное отражение, если отражающая грань без зеркального покрытия?
- 2.4.5. Прямоугольная равнобедренная стеклянная призма, у которой показатель преломления  $n_2 = 1,48$ , находится в воздухе. Определить угол падения лучей на входную грань этой призмы, при котором отражающая грань может быть еще без зеркального покрытия.
- 2.4.6. Угол полного внутреннего отражения равен при падении света из некоторой среды в стекло равен  $47^\circ$ . Показатель преломления стекла  $n_1 = 1,52$ . Определить диэлектрическую проницаемость этой среды.
- 2.4.7. На входную грань прямоугольной равнобедренной призмы, изготовленной из стекла с показателем преломления  $n_2 = 1,7$ , падает свет

- под углом  $10^\circ$ . Можно ли в этом случае не наносить на отражающую грань зеркальное покрытие?
- 2.4.8. Показатель преломления первой среды  $n_1=2$ . Угол полного внутреннего отражения равен  $45^\circ$ . Определить диэлектрическую проницаемость второй среды.
- 2.4.9. Свет падает из стекла в воздух под углом  $42^\circ$ . Показатель преломления для стекла  $n_1 = 1,45$ , для воздуха –  $n_2 = 1$ . Будет ли происходить полное внутренне отражение? Ответ обосновать.
- 2.4.10. Свет падает на входную грань прямоугольной равнобедренной призмы под углом  $4^\circ$ . Призма изготовлена из стекла с показателем преломления  $n_2 = 1,58$  и находится в воздухе. Нужно ли наносить на отражающую грань зеркальное покрытие?
- 2.4.11. Показатель преломления первой среды  $n_1 = 2$ , второй  $n_2 = 1$ . При каком наименьшем угле падения (в градусах) возможно явление полного внутреннего отражения?
- 2.4.12. На входную грань прямоугольной равнобедренной призмы, изготовленной из стекла с показателем преломления  $n_2 = 1,7$ , падает свет под углом  $10^\circ$ . Можно ли в этом случае не наносить на отражающую грань зеркальное покрытие?
- 2.4.13. Какой должен быть предельный угол падения лучей на входную грань прямоугольной равнобедренной призмы, при котором отражающая грань может быть еще без зеркального покрытия. Призма изготовлена из стекла  $n_2=1,4$  и находится в воздухе.
- 2.4.14. Будет ли происходить полное внутренне отражение при падении света из воды в воздух под углом  $46^\circ$ ? Показатель преломления для воды  $n_1 = 1,333$ , для воздуха –  $n_2 = 1$ . Ответ обосновать.
- 2.4.15. Свет падает на входную грань прямоугольной равнобедренной призмы под углом  $5^\circ$ . Призма изготовлена из стекла с показателем преломления  $n_2 = 1,48$  и находится в воздухе. Нужно ли наносить на отражающую грань зеркальное покрытие?

## 2.5 Поляризация света. Формулы Френеля

Формулы Френеля определяют амплитуды и интенсивности преломлённой и отражённой электромагнитной волны при прохождении через плоскую границу раздела двух сред с разными показателями преломления. Названы в честь Огюста Френеля, французского физика, который их вывел. Отражение света, описываемое формулами Френеля, называется френелевским отражением. Формулы Френеля справедливы в том случае, когда граница раздела двух сред гладкая, среды изотропны, угол отражения равняется углу падения, а угол преломления определяется законом Снеллиуса.

Закон Брюстера – закон оптики, выражающий связь показателей преломления двух диэлектриков с таким углом падения света, при котором свет, отражённый от границы раздела диэлектриков, будет полностью поляризованным в плоскости, перпендикулярной плоскости падения.

**Цель** – научиться проводить расчеты оптических констант материала с использованием формул Френеля.

### 2.5.1 Поляризация света. Формулы Френеля. Закон Брюстера.

На границе двух диэлектриков амплитуды падающей  $\bar{E}_{00}$ , отраженной  $\bar{E}_{01}$  и преломленной  $\bar{E}_{02}$  волн, связаны между собой формулами Френеля. В случае нормального падения на границу двух сред формулы Френеля имеют вид:

$$E_{01} = \frac{|n_1 - n_2|}{n_1 + n_2} E_{00}, \quad (2.16)$$

$$E_{02} = \frac{2n_1}{n_1 + n_2} E_{00}. \quad (2.17)$$

Коэффициент отражения

$$R = \frac{E_{01}^2}{E_{00}^2}. \quad (2.18)$$

Коэффициент пропускания

$$T = \frac{E_{02}^2 n_2 \cos \varphi_2}{E_{00}^2 n_1 \cos \varphi_1}. \quad (2.19)$$

где  $\varphi_1$ – угол падения,  $\varphi_2$ – угол преломления,  $n_1$  и  $n_2$  – коэффициенты преломления двух граничащих сред.

При нормальном падении

$$R = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2; \quad T = \frac{4n_1 n_2}{(n_1 + n_2)^2}. \quad (2.20)$$

Отражение естественного света, который можно представить как некогерентную смесь двух линейно поляризованных волн с ортогональными направлениями поляризации, обладает замечательным свойством: при падении естественного света под углом  $\varphi = \varphi_{Br}$ , отразится только составляющая, поляризованная перпендикулярно плоскости падения, и отраженный свет будет полностью линейно поляризованным. В этом состоит закон Брюстера, открытый экспериментально в 1815 г. Угол  $\varphi_{Br}$  называется еще углом полной

поляризации, а сумма углов падения и преломления равна  $\pi/2$ . Из закона преломления получаем  $\text{tg}\varphi_{\text{Бр}} = n_2 / n_1$ .

При угле Брюстера отраженная волна всегда линейно поляризована в направлении, перпендикулярном плоскости падения, а волна, поляризованная в плоскости падения, не отражается вообще. Из сказанного следует, что эффект Брюстера возможен лишь при поляризации падающего луча в плоскости падения. Если же падающий луч поляризован перпендикулярно плоскости падения, то отраженный луч должен наблюдаться под любым углом падения.

В газовых лазерах торцевые окна разрядной трубки представляют собой плоскопараллельные стеклянные пластинки, расположенные под углом Брюстера к оси трубки. Благодаря этому излучение, распространяющееся вдоль оси трубки в образованном зеркалами открытом резонаторе и поляризованное в плоскости падения на пластинки, проходит сквозь них беспрепятственно, не испытывая отражения. В результате лазер генерирует свет, поляризованный в этой плоскости.

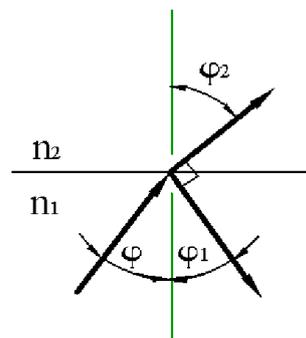


Рис. 2.8. К определению угла Брюстера

### 2.5.2 Примеры решения задач по теме «Поляризация света. Формулы Френеля»

**Задача 1.** Сколько процентов светового потока теряется на отражение в призматическом бинокле? Показатель преломления стекла призм и линз равен 1,5. Схема бинокля дана на рисунке.

*Решение.*

Отметим, что падение при потерях на отражение нормальное. При углах  $\varphi_1 = 45^\circ$  (что следует из поворота луча по выходе из призмы) происходит полное внутреннее отражение от стекла и потерь нет. Потери происходят восемь раз: на двух поверхностях двух стеклянных линз, при выходе и входе из каждой поворотной призмы.

При нормальном падении  $R$  и  $T$  определены:

$$R = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 ; T = \frac{4 n_1 n_2}{(n_1 + n_2)^2}.$$

$R + T = 1$  (по закону сохранения энергии).

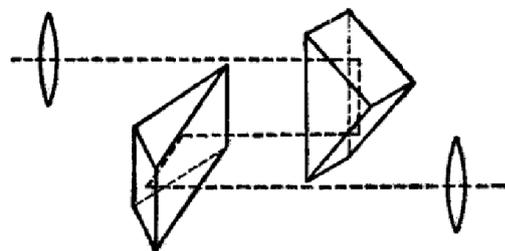
1) Пользуясь этим, найдем  $R_1$  и  $T_1$  (на первой поверхности линзы):

$$R_1 = \left( \frac{0,5}{2,5} \right)^2 = \frac{1}{25} = 0,04.$$

$T = 0,96$ .

2) На второй поверхности линзы:

$$R_2 = 0,96 \cdot 0,04;$$



$$T_2 = 0,96 \cdot (1 - 0,04) = 0,96^2.$$

3) На первой поверхности первой призмы (третьей поверхности):

$$R_3 = 0,96^2 \cdot 0,04;$$

$$T_3 = 0,96^2 \cdot (1 - 0,04) = 0,96^3.$$

4) Аналогично - на восьмой поверхности второй призмы

$$T_8 = 0,96^8;$$

$$R_8 = (1 - 0,96^8);$$

$$\text{Или в \%: } R_8 = (1 - 0,96^8) \cdot 100\% = 28\%.$$

*Ответ:* потери на отражение составляют 28 %.

*Задача 2.* Найти угол полной поляризации для света, отраженного от стекла с показателем преломления  $n = 1,5$ . Найти степень поляризации преломленного

света  $\Delta = \frac{I_{\parallel} - I_{\perp}}{I_{\parallel} + I_{\perp}}$  при падении света под этим углом (Индекс « $\parallel$ » означает, что

рассматривается та компонента вектора  $\vec{E}$  электромагнитной волны, которая параллельна плоскости падения, индекс « $\perp$ » – компонента, перпендикулярная плоскости падения). Падающий свет – естественный.

*Решение.*

$$\operatorname{tg} \varphi_{\text{Бр}} = n_2 / n_1; n_1 = 1; n_2 = 1,5;$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{\text{Бр}} = 1,5; \varphi_{\text{Бр}} = 56^{\circ}19'.$$

2) Для определения степени поляризации  $\Delta$  необходимо определить  $I_{\parallel}$ ,  $I_{\perp}$  при падении на стекло под углом Брюстера (то есть углом полной поляризации):

а) необходимо воспользоваться формулами Френеля;

Свет можно представить в виде двух равных по модулю взаимно перпендикулярных компонент:

$$(E_{00})_{\perp}^2 = (E_{00})_{\parallel}^2 = \frac{1}{2} I_0,$$

Поэтому

$$R_{\perp} = \frac{(E_{01})_{\perp}^2}{1/2 \cdot I_0}, R_{\parallel} = \frac{(E_{01})_{\parallel}^2}{1/2 \cdot I_0}.$$

б) вспомните, что коэффициент пропускания

$$T = \frac{n_2 \cos \varphi_2 (E_{02})_{\perp}^2}{n_1 \cos \varphi_1 (E_{00})_{\perp}^2}.$$

Так как в соответствии с законом Брюстера во вторую среду пропускается вся параллельная компонента, то

$$I_{\parallel} = (E_{00})_{\parallel}^2 = \frac{1}{2} I_0.$$

Компонента  $I_{\perp}$ , прошедшая вторую среду -  $I_{\perp} = \frac{1}{2} I_0 \cdot T$ , или с учетом формулы

$$R_{\perp} = \frac{(E_{01})_{\perp}^2}{1/2 \cdot I_0} \text{ и формулы Френеля}$$

$$I_{\perp} = \frac{1}{2} I_0 \frac{n_2 \cos \varphi_2}{n_1 \cos \varphi_1} \cdot \left( \frac{2 \sin \varphi_2 \cos \varphi_1}{\sin(\varphi_1 + \varphi_2)} \right)^2.$$

Так как  $\varphi_1 + \varphi_2 = \frac{\pi}{2}$ ,  $\operatorname{tg} \varphi_1 = n$ , то  $\sin^2 \varphi_1 = \frac{n^2}{1+n^2}$ , где  $n = \frac{n_2}{n_1}$ .

Тогда

$$I_{\perp} = \frac{1}{2} I_0 \frac{\sin \varphi_1 \cos \varphi_2}{\sin \varphi_2 \cos \varphi_1} \cdot \frac{4 \sin^2 \varphi_2 \cos^2 \varphi_1}{1} = \frac{1}{2} I_0 \frac{4 \sin^2 \varphi_1 \cos^2 \varphi_1}{1} = \frac{1}{2} I_0 \cdot 4 \left( \frac{n^2}{1+n^2} \right).$$

$$\left( 1 - \frac{n^2}{1+n^2} \right) = \frac{1}{2} I_0 \frac{4n^2}{(1+n^2)^2}.$$

Определим степень поляризации

$$\Delta = \frac{1 - \frac{4n^2}{(1+n^2)^2}}{1 + \frac{4n^2}{(1+n^2)^2}} = \frac{(1+n^2)^2 - 4n^2}{(1+n^2)^2 + 4n^2}.$$

Вычислим  $\Delta \approx 0,08$  (или 8%).

*Ответ:*  $\Delta = \frac{(1+n^2)^2 - 4n^2}{(1+n^2)^2 + 4n^2}$ ;  $\Delta = 8\%$ .

**Задача 3.** Пучок света, идущий в воздухе, падает на поверхность жидкости под углом  $\theta_1 = 54^\circ$ . Определить угол преломления  $\theta_2$  пучка, если отраженный пучок полностью поляризован, т.е. свет падает на границу раздела двух сред под углом Брюстера.

*Решение.*

Отраженный пучок света будет полностью поляризован, если свет падает на границу раздела двух сред под углом Брюстера.

Угол падения Брюстера определяется условием:  $\operatorname{tg} \theta_1 = n_2/n_1$ , где  $n_1$  и  $n_2$  - показатели преломления сред, в которых распространяются, соответственно, падающий и преломленный лучи света. Угол преломления  $\theta_2$  можно определить с помощью закона преломления световых лучей на границе раздела двух сред:

$$\text{сред:} \quad \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Учитывая, что  $\operatorname{tg} \theta_1 = \sin \theta_1 / \cos \theta_1$ , получаем:

$$\frac{\sin \theta_1}{\cos \theta_1} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Откуда следует, что  $\cos \theta_1 = \sin \theta_2$  или  $\sin(90^\circ - \theta_1) = \sin \theta_2$ . Так как углы  $\theta_1$  и  $\theta_2$  оба меньше  $90^\circ$ , то последнее соотношение дает  $90^\circ - \theta_1 = \theta_2$  или  $\theta_1 + \theta_2 = 90^\circ$ . Таким образом, мы доказали полезное утверждение: если свет падает под

углом Брюстера, то сумма углов падения и преломления равна  $90^\circ$ . Поэтому в нашей задаче угол преломления равен  $90^\circ - 54^\circ = 36^\circ$ . Ответ:  $\theta_2 = 36^\circ$ .

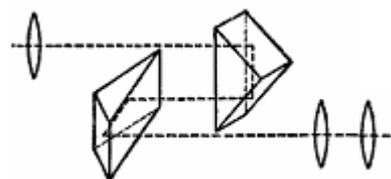
### 2.5.3 Задачи для самостоятельного решения

2.5.1 Угол преломления луча в жидкости  $i_2 = 35^\circ$ . Определить показатель преломления  $n$  жидкости, если известно, что отраженный пучок света максимально поляризован.

2.5.2 Угол Брюстера  $\varphi_{Br}$  при падении света из воздуха на кристалл каменной соли равен  $57^\circ$ . Определить скорость света в этом кристалле.

2.5.3 Пучок естественного света падает на стеклянную призму с показателем преломления  $n = 1,6$ . Определить угол падения  $\theta$ , если отраженный пучок максимально поляризован.

2.5.4 Сколько процентов светового потока теряется на отражение в призматическом бинокле? Показатель преломления стекла призм и линз равен 1,54. Схема бинокля дана на рисунке.



2.5.5 Чему равна скорость света в стекле, если угол Брюстера  $\varphi_{Br}$  при падении света из воздуха на стекло равен  $55^\circ$ .

2.5.6 Предельный угол полного внутреннего отражения пучка света на границе жидкости с воздухом равен  $\theta = 43^\circ$ . Определить угол Брюстера  $\varphi_{Br}$  для падения луча из воздуха на поверхность этой жидкости.

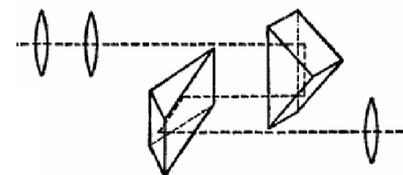
2.5.7 Определить угол преломления  $\varphi_2$  пучка, падающего на поверхность стекла под углом Брюстера  $\varphi_1 = 57^\circ$ .

2.5.8 Определить угол полной поляризации, если свет падает из воды (показатель преломления воды 1,33) в стекло (показатель преломления стекла 1,6).

2.5.9 Свет падает из воздуха на кристалл NaCl. Угол Брюстера  $\varphi_{Br}$  при падении света из воздуха на кристалл равен  $57^\circ$ . Определить скорость света в NaCl.

2.5.10 Максимальная интенсивность света, пропускаемого через анализатор, отличается от минимальной в три раза. Чему равна степень поляризации  $P$  частично поляризованного света?

2.5.11 Сколько процентов светового потока теряется на отражение в призматическом бинокле? Показатель преломления стекла призм и линз равен 1,48. Схема бинокля дана на рисунке.



2.5.12 Определить угол Брюстера  $\varphi_{Br}$  для падения луча из воздуха на поверхность воды. Предельный угол полного внутреннего отражения пучка света на границе воды с воздухом равен  $\theta = 48^\circ$ .

2.5.13 Свет падает на границу раздела двух сред под углом Брюстера  $\varphi_{Br} = 53^\circ 18'$ . Чему равен преломления света.

- 2.5.14 Определить угол падения  $\varphi$  света на поверхность воды, если отраженный пучок максимально поляризован. Показателем преломления воды  $n = 1,33$ .
- 2.5.15 Определить скорость света в алмазе, если угол полной поляризации света при отражении от поверхности алмаза равен  $67^{\circ}30'$ .
- 2.5.16 Свет падает из воздуха на кварцевое стекло. Определить угол Брюстера  $\varphi_{Br}$  для падения луча из воздуха на поверхность кварцевого стекла. Предельный угол полного внутреннего отражения пучка света на границе жидкости с кварцевым стеклом равен  $\varphi = 44^{\circ}$ .

### 3 Кристаллическое состояние вещества

#### 3.1 Параметры кристаллической решетки

Кристаллические решетки характеризуются следующими основными параметрами: *периодом решетки, атомным радиусом, базисом, коэффициентом компактности и координационным числом.*

*Периодом* решетки называется расстояние между центрами соседних ионов (атомов). Периоды  $a, b, c$  (рис. 6.1) выражаются в нанометрах ( $1\text{ нм} = 10^{-9}\text{ м} = 10\text{ \AA}$ ).

Период кубической решетки  $a$  находится в пределах  $0,286...0,607$  нм. Для гексагональных решеток  $a = 0,228...0,398$  нм,  $c = 0,357...0,652$  нм.

*Атомный радиус* – половина межатомного расстояния между центрами ближайших атомов в кристаллической решетке при нормальной температуре и атмосферном давлении. Атомный радиус не является неизменной величиной. Он зависит от многих факторов, важнейшими из которых являются координационное число и тип химической связи между атомами.

*Базисом* решетки называется количество атомов, приходящихся на одну элементарную ячейку решетки.

Пусть  $Z$  – число шаров, приходящихся на элементарную ячейку,  $N_i$  – число шаров внутри ячейки,  $N_f$  – число шаров на ее гранях,  $N_e$  – на ребрах,  $N_c$  – на вершинах ячейки. Тогда  $Z = N_i + \frac{1}{2}N_f + \frac{1}{4}N_e + \frac{1}{8}N_c$ .

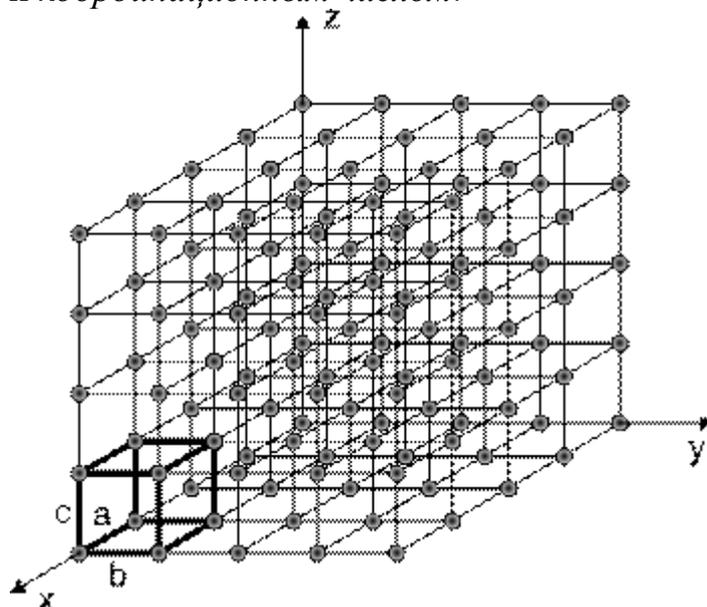


Рис. 3.1. Схема кристаллической решетки ( $a, b, c$  – периоды кристаллической решетки)

Коэффициентом компактности  $\eta$  решётки называется отношение объёма атомов  $V_a$ , входящих в решётку, ко всему объёму решётки  $V_p$ :  $\eta = V_a/V_p \cdot 100\%$ .

Координационное число  $K$  соответствует числу атомов (ионов), находящихся на наиболее близком равном расстоянии от выбранного атома кристаллической решётки.

### 3.2 Примеры решения задач по теме «Кристаллическое состояние вещества»

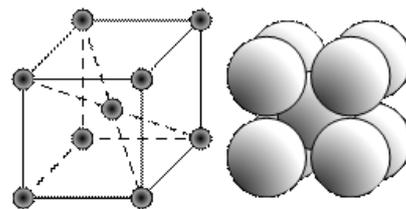
**Задача 1.** Найти базис  $Z$  объёмно-центрированной кубической решётки.

*Решение.*

В объёмно-центрированной кубической решётке (рис. 2, а) атомы (ионы) расположены в вершинах и в центре объёма куба. Каждый угловой атом принадлежит восьми соседним ячейкам. Следовательно, одной ячейке принадлежит  $1/8$  углового атома. Только внутренний атом целиком принадлежит данной ячейке. Значит на одну ячейку объёмно-центрированной кубической решётки приходится

$$Z = 8 \cdot 1/8 + 1 = 2 \text{ атома.}$$

*Ответ:*  $Z = 2$ .



**Задача 2.** Вычислить коэффициент компактности для примитивной кубической решетки.

*Решение.*

Коэффициент компактности  $\eta$  равен отношению суммарного объёма атомов, входящих в решётку, к объёму решетки:

$$\eta = \frac{4\pi r^3 Z}{3V}$$

где  $r$  — радиус атома (иона);  $Z$  — базис, или число атомов, приходящихся на одну элементарную ячейку;  $V$  — объём элементарной ячейки.

Пусть  $Z$  — число шаров, приходящихся на элементарную ячейку,  $N_i$  — число шаров внутри ячейки,  $N_f$  — число шаров на ее гранях,  $N_e$  — на ребрах,  $N_c$  — на вершинах ячейки. Тогда  $Z = N_i + \frac{1}{2}N_f + \frac{1}{4}N_e + \frac{1}{8}N_c$ .

Для примитивной кубической ячейки

$$Z = (1/8) \cdot 8 = 1, \quad a = 2r, \quad V = a^3 = (2r)^3.$$

$$\eta = \frac{4\pi r^3}{24r^3} = \frac{\pi}{6} = 0,52.$$

*Ответ:* коэффициент компактности  $\eta = 52\%$ .



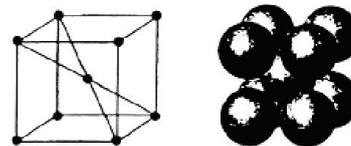
### 3.3 Задачи для самостоятельного решения

3.3.1 Найти базис  $Z$  и координационное число  $K$  для гранецентрированной кубической решётки.

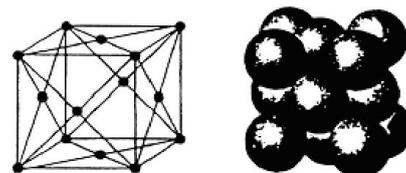
3.3.2 Найти базис  $Z$  и координационное число  $K$  для гексагональной плотноупакованной решётки.

3.3.3 Найти базис  $Z$  и координационное число  $K$  для ромбической базоцентрированной решётки.

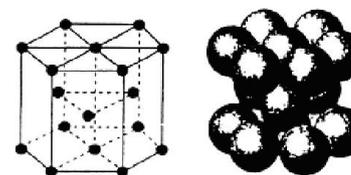
3.3.4 Вычислить коэффициент компактности для объемно-центрированной кубической решетки.



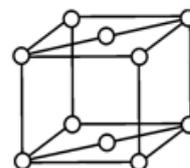
3.3.5 Вычислить коэффициент компактности для гранецентрированной кубической решетки.



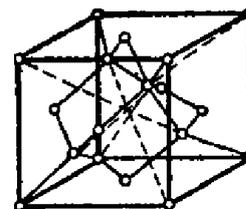
3.3.6 Вычислить коэффициент компактности для гексагональной плотноупакованной решетки.



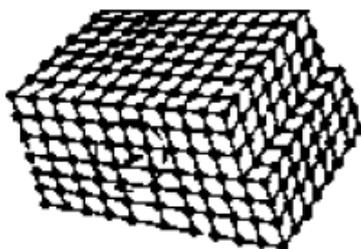
3.3.7 Вычислить коэффициент компактности для кубической базоцентрированной решетки.



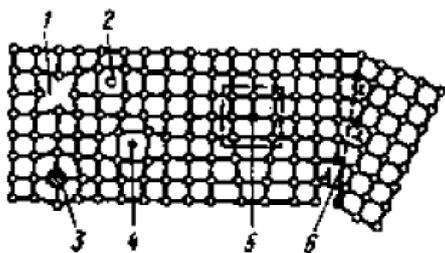
3.3.8 Вычислить коэффициент компактности для алмазной решетки.



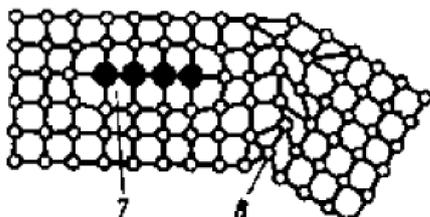
3.3.9 Определить дефект. Каково влияние этого дефекта на свойства материала?



3.3.10 Определить дефект. Каково влияние этого дефекта на свойства материала?



3.3.11 Определить дефект. Каково влияние этого дефекта на свойства материала?



## 4 Нелинейные оптические кристаллы

Диэлектрик обладает малой проводимостью  $\gamma \sim 10^{-17} \div 10^{-8} \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$ , ( $\rho \sim 10^8 \div 10^{17} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ). В рамках макроскопической теории, рассматривающей диэлектрик как сплошную среду, высокое удельное сопротивление диэлектрика объясняется тем, что в диэлектриках мало свободных носителей заряда (электронов, дырок, слабосвязанных ионов). Концентрация электронов при комнатной температуре в диэлектриках равна  $n_e \sim 10^{14} \div 10^{21} \text{ м}^{-3}$ . А в металлах концентрация свободных электронов практически такая же, как и атомов ( $n_e \sim 10^{29} \text{ м}^{-3}$ ).

С точки зрения микроскопической теории диэлектриков различная концентрация свободных электронов в диэлектриках и металлах обусловлена разной природой их химических связей. Для проводников характерна *металлическая связь*, основанная на общности всех электронов, в диэлектриках встречается *ионная, ковалентная, молекулярная связь*, которая обусловлена связанными состояниями электронов. В результате электрическое поле, приложенное к диэлектрику, практически не приводит к переносу свободных электронов – электропроводности, но вызывает смещение связанных зарядов, т.е. *электрическую поляризацию*.

**Диэлектрик** (согласно ГОСТу 1988-74) – это вещество, основным электрическим свойством которого является способность поляризоваться в электрическом поле.

Под действием электрического поля в диэлектрике происходит смещение связанных зарядов, что является причиной *поляризации* диэлектрика, связанной с направленным перемещением в материале большого количества связанных зарядов. В результате этого диэлектрик приобретает электрический момент. Поэтому в ГОСТе 19880-74 дается такое определение.

**Поляризация** – это состояние вещества, характеризуемое тем, что электрический момент данного объема этого вещества имеет значение, отличное от нуля.

Следствия поляризации:

1. Появление нескомпенсированного связанного заряда на поверхности диэлектрика.
2. Ослабление электрического поля внутри диэлектрика, вызвавшего поляризацию.
3. Деформация материала (*электрострикция*).
4. Разогрев материала (вследствие смещения частиц).

#### 4.1 Поляризованность и плотность связанных зарядов.

##### Поляризуемость. Диэлектрическая восприимчивость.

Количественно интенсивность поляризации определяется *поляризованностью*  $\vec{P}$ .

Пусть сумма всех электрических моментов в диэлектрике в некотором объеме  $V$ , возникших в результате поляризации, равна  $M$ . Мерой поляризации является величина, равная электрическому моменту единицы объема, которая и называется **поляризованностью**.

В случае однородного диэлектрика

$$\vec{P} = \frac{\vec{M}}{V}. \quad (4.1)$$

*Поляризованность* – векторная величина. Ее направление совпадает с направлением электрического момента от отрицательного заряда к положительному.

Можно найти еще одно выражение для поляризованности. В результате поляризации на поверхности диэлектрика возникают связанные заряды ( $\sigma_{св}$ ). В глубине диэлектрика положительные и отрицательные заряды компенсируют друг друга, электрический момент всего объема равен произведению заряда на расстояние между поверхностями, на которых возник заряд.

$$M = Q \cdot d = \sigma_{св} \cdot S \cdot d = P \cdot V = P \cdot S \cdot d \Rightarrow P = \sigma_{св} \cdot [P] = [Кл / м^2].$$

Т.о. *поляризованность равна поверхностной плотности связанных зарядов в диэлектрике*.

Если в общем случае в диэлектрике есть несколько видов частиц, которые участвуют в разных видах поляризации, то поляризованность равна

$$P = \sum_{i=1}^k n_i \mu_i = \sum_{i=1}^k P_i, \quad (4.2)$$

где  $n_i, \mu_i$  - концентрация и электрический момент частиц  $i$ -того сорта,  $k$  – количество сортов частиц, участвующих в поляризации.

Если и поле и вещество однородны, т.е. у всех частиц электрический момент  $\mu$  одинаков, то

$$P = n\mu. \quad (4.3)$$

Интуитивно понятно, что у диэлектриков электрический момент  $\bar{\mu}$  пропорционален напряженности внешнего поля  $E$ . Тогда можно записать

$$\mu = \alpha E, \quad (4.4)$$

$$P = n\alpha E, \quad (4.5)$$

где  $\alpha$  – поляризуемость. Она характеризует способность к поляризации отдельной частицы, т.е. это микроскопическая характеристика вещества. Ей пользоваться не всегда удобно.

С другой стороны, из эксперимента известно, что зависимость  $P = f(E)$  – это линейная функция. Такие диэлектрики называются линейными. Для них можно ввести коэффициент пропорциональности  $\kappa_a$ , который называется абсолютной диэлектрической восприимчивостью.

$$P = \kappa_a E.$$

Но чаще для описания чувствительности диэлектрика к действию электрического поля используют величину  $\kappa$  – относительную диэлектрическую восприимчивость. Это безразмерная величина, равная

$$\kappa = \frac{\kappa_a}{\varepsilon_0},$$

$$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$$

Тогда поляризованность равна

$$P = \varepsilon_0 \kappa E.$$

$$\kappa = \frac{n\alpha}{\varepsilon_0},$$

т.е. микроскопическую характеристику вещества  $\kappa$  можно выразить через микроскопическую характеристику  $\alpha$ .

В технике при «макроскопическом» рассмотрении способности материалов к поляризации чаще используют другой безразмерный параметр – относительную диэлектрическую проницаемость.

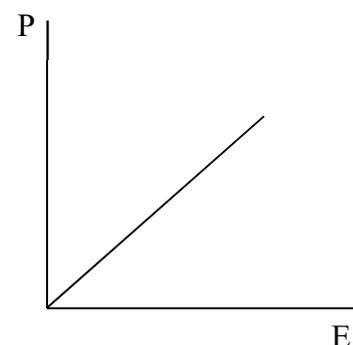
Диэлектрическая проницаемость материалов.

Если взять плоский конденсатор в вакууме, то заряд на каждой его пластине равен (по модулю):

$$Q_0 = \frac{\varepsilon_0 \cdot S \cdot U}{d} \quad (4.6)$$

где  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая постоянная, или диэлектрическая проницаемость вакуума,  $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м,  $S$  – площадь каждой из пластин,  $d$  – зазор между пластинами,  $U$  – напряжение между ними. Разделив на площадь и перейдя к плотности заряда на обкладке получим  $\sigma_s = \varepsilon_0 E$ .

Если в межэлектродное пространство ввести диэлектрик, то что произойдет? Все зависит от того, подключен заряженный конденсатор к источнику или отключен. В подключенном конденсаторе напряжение между



пластинами принудительно поддерживается, но заряд на каждой пластине увеличивается до нового значения  $Q_m$ .

Отношение  $\frac{Q_m}{Q_0} = \varepsilon$  называется *диэлектрической проницаемостью* материала.

Из самого определения видно, что диэлектрическая проницаемость материала является безразмерной величиной. Перейдя к плотности заряда на обкладке в случае диэлектрика получим  $\sigma_s = \varepsilon_0 \varepsilon E$ .

#### 4.1.1 Примеры решения задач по теме «Поляризованность и плотность связанных зарядов. Поляризуемость. Нелинейные оптические кристаллы»

*Задача 1.* Композиционный термокомпенсированный керамический материал изготовлен на основе двух диэлектриков с диэлектрическими проницаемостями  $\varepsilon_1 = 40$  и  $\varepsilon_2 = 80$ . Предполагая хаотическое распределение компонентов, определить состав керамики, если  $TK\varepsilon_1 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ ;  $TK\varepsilon_2 = -1,5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ . Чему равна диэлектрическая проницаемость композиционного диэлектрика?

*Решение.*

Для расчета  $\varepsilon$  используем формулу Лихтенеккера в виде

$$\ln \varepsilon = \Theta_1 \ln \varepsilon_1 + \Theta_2 \ln \varepsilon_2,$$

где  $\Theta_1$  и  $\Theta_2$  - объемные концентрации компонентов.

$$TK\varepsilon = \Theta_1 TK\varepsilon_1 + \Theta_2 TK\varepsilon_2$$

(Это можно получить, продифференцировав формулу Лихтенеккера).

Решаем систему уравнений

$$\Theta_1 TK\varepsilon_1 + \Theta_2 TK\varepsilon_2 = 0$$

$$\Theta_1 + \Theta_2 = 1.$$

В результате получим

$$\Theta_1 = \frac{-TK\varepsilon_2}{TK\varepsilon_1 - TK\varepsilon_2} = 0,88; \Theta_2 = 1 - \Theta_1 = 0,12.$$

Зная  $\Theta_1$  и  $\Theta_2$ , можно найти  $\varepsilon$  по формуле Лихтенеккера

$$\varepsilon = 43,4.$$

Ответ:  $\Theta_1 = 0,88, \Theta_2 = 0,12, \varepsilon = 43,4$ .

*Задача 2.* Вычислить поляризованность монокристалла каменной соли, считая, что смещение ионов под действием электрического поля от положения равновесия составляет 1% расстояния между ближайшими соседними ионами. Элементарная ячейка кристалла имеет форму куба, расстояние между соседними ионами  $a = 0,28 \text{ нм}$ .

*Решение.*

Поляризованность диэлектрика численно равна отношению электрического момента  $dM$  к объему  $dV$  этого диэлектрика

$$P = \frac{dM}{dV}.$$

Если выбрать  $dV = a^3$ ,  $dM = q\Delta x$ , где  $q$  – заряд иона, равный заряду электрона;  $\Delta x$  – смещение ионов под действием поля. Тогда

$$P = \frac{q\Delta x}{da^3} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2,8 \cdot 10^{-10} \cdot 10^2}{(0,28 \cdot 10^{-9}) \cdot 3} \approx 0,02 \text{ Кл/м}^2.$$

**Задача 3.** Спонтанная поляризованность монокристаллов титаната бария при комнатной температуре равна  $0,25 \text{ Кл}\cdot\text{м}^{-2}$ . Предполагая, что причиной возникновения спонтанной поляризации является только смещение иона титана из центра элементарной кубической ячейки, определить это смещение. Период идентичности  $a$  решетки принять равным  $0,4 \text{ нм}$ .

*Решение.*

Поляризованность есть электрический момент единицы объема:

$$P = q\Delta l / V,$$

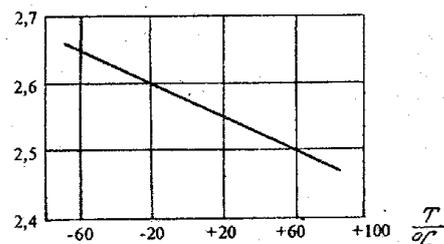
где  $q$  – заряд иона;  $\Delta l$  – смещение;  $V$  – объем элементарной ячейки. Заряд иона титана  $\text{Ti}^{4+}$   $q = 4e$ ,  $V = a^3$ . Тогда  $\Delta l = PV/q = 2,5 \cdot 10^{-11} \text{ м} = 0,025 \text{ нм}$ .

*Ответ:*  $\Delta l = 0,025 \text{ нм}$ .

#### 4.1.2 Задачи для самостоятельного решения

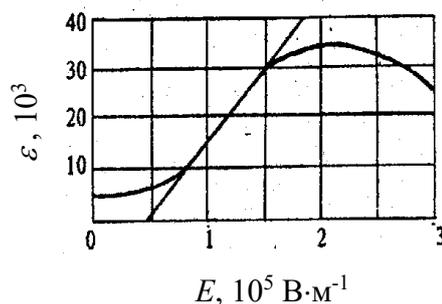
- 4.1.1. Электрический момент молекулы HCl равен  $1,04 \text{ Дб}$ . Если считать, что заряд эквивалентного ей диполя равен одному элементарному заряду, то чему равен размер плеча диполя?
- 4.1.2. Электрический момент молекулы HCl, помещенной в электрическое поле с напряженностью  $2 \cdot 10^6 \text{ В/м}$  равен  $1,04 \text{ Д}$ . Продольная ось молекулы ориентирована под углом  $60^\circ$  относительно направления вектора напряженности. Чему равен момент сил, действующий на молекулу в электрическом поле?
- 4.1.3. Поляризованность, созданная в диэлектрике электрическим полем с напряженностью  $2 \cdot 10^7 \text{ В/м}$ , составляет  $8 \cdot 10^{-6} \text{ Кл/м}^2$ . Чему равна относительная проницаемость диэлектрика?
- 4.1.5. У кристаллического диэлектрика с одним типом примеси при температуре минус  $20^\circ\text{C}$  время релаксации ионно-релаксационной поляризации равно  $1,2 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ , при  $100^\circ\text{C}$  оно равно  $1,2 \cdot 10^{-8} \text{ с}$ , чему равно время релаксации при  $30^\circ\text{C}$ ? Дайте ответ на основе теоретической формулы для слабых полей.
- 4.1.6. При включении постоянного напряжения  $200 \text{ В}$  поляризованность, обусловленная релаксационной поляризацией, изменяется со временем  $t$  (в секундах) по закону  $P(t) = 5,42 \cdot 10^{-6} [1 - \exp(-400t)] \text{ Кл/м}^2$ . Чему равно время релаксации в миллисекундах.
- 4.1.7. При включении постоянного напряжения  $200 \text{ В}$  поляризованность, обусловленная релаксационной поляризацией, изменяется со временем  $t$  (в секундах) по закону  $P(t) = 5,42 \cdot 10^{-6} [1 - \exp(-400t)] \text{ Кл/м}^2$ . Чему равна поляризованность в момент времени  $t = 2 \text{ мин}$ . после выключения напряжения?

4.1.8. На рисунке представлен график зависимости диэлектрической проницаемости полистирола от температуры  $T$ . Чему равен температурный коэффициент диэлектрической проницаемости при  $T = -60^\circ\text{C}$ ?



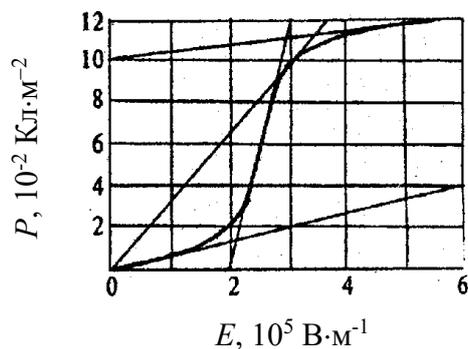
4.1.9. Известно, что ниобат калия кристаллизуется в структуре перовскита с периодом решетки  $c \approx a = 0,4$  нм. Определить электрический дипольный момент на одну элементарную ячейку, если спонтанная поляризованность этого сегнетоэлектрика  $P = 0,3$  мкКл·м<sup>-2</sup>.

4.1.10. На рисунке представлен график зависимости поляризованности  $P$  сегнетокерамики от напряженности электрического поля  $E$  и даны касательные к различным точкам кривой. Чему равна максимальная относительная диэлектрическая проницаемость сегнетокерамики?



4.1.11. На рисунке представлен график зависимости поляризованности  $P$  сегнетокерамики от напряженности электрического поля  $E$  и даны касательные к различным точкам кривой. На сколько отличается значение электрической индукции от значения поляризованности при напряженности поля  $2 \cdot 10^5$  В/м? Положительное число в ответе означает, что индукция больше поляризованности, отрицательное число означает обратное.

4.1.12. На рисунке представлен график зависимости диэлектрической проницаемости сегнетокерамики от напряженности электрического поля и дана касательная к точке перегиба графика. На сколько отличается значение электрической индукции от значения поляризованности при напряженности поля  $1,5 \cdot 10^5$  В/м? Положительное число в ответе означает, что индукция больше поляризованности, отрицательное число означает обратное.



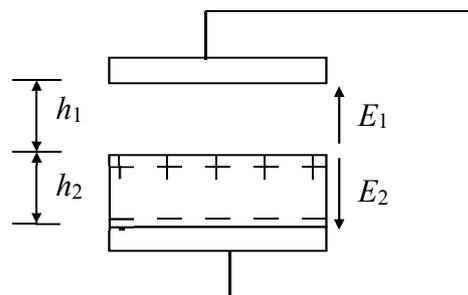
4.1.13. Сегнетоэлектрик с прямоугольной петлей гистерезиса имеет коэрцитивную силу  $2 \cdot 10^4$  В/м и остаточную индукцию  $8 \cdot 10^{-2}$  Кл·м<sup>-2</sup>. Чему равна тепловая мощность, выделяемая в единице объема сегнетоэлектрика при воздействии синусоидального электрического

поля частотой 50 Гц и амплитудой? Петлю гистерезиса считайте идеально прямоугольной.

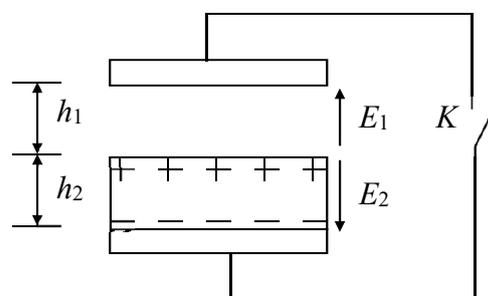
4.1.14. Из двух пьезокристаллических материалов  $A$  и  $B$ , различных по составу, но имеющих одинаковую кристаллическую структуру изготовили два одинаковых по форме цилиндрических стержня длиной 5 см и диаметром 3 мм. Линия продольного пьезоэффекта в обоих стержнях совпадает с их геометрическими осями. Масса стержня  $A$  равна 0,7 г, стержня  $B$  - 1,9 г. Модуль продольной упругости стержня  $A$  равен  $2,9 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>, а стержня  $B$  - на  $5,6 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>. Во сколько раз частота первой гармоники пьезорезонанса стержня  $A$  отличается от частоты первой гармоники стержня  $B$ ? В ответе укажите отношение частоты первой гармоники стержня  $A$  к частоте первой гармоники стержня  $B$ .

4.1.15. Из двух пьезокристаллических материалов  $A$  и  $B$ , различных по составу, но имеющих одинаковую кристаллическую структуру требуется изготовить цилиндрические стержни для пьезорезонаторов с одинаковой частотой продольного резонанса и одинаковым сечением, имеющим площадь 5 мм<sup>2</sup>. Линия продольного пьезоэффекта в обоих стержнях совпадает с их геометрическими осями. Плотность стержня  $A$  равна 2500 кг/м<sup>3</sup>, стержня  $B$  - 4000 кг/м<sup>3</sup>. Модуль продольной упругости стержня  $A$  равен  $2,9 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>, а стержня  $B$  - на  $5,6 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>. Если длина стержня  $A$  равна 5 см, то чему равна длина стержня  $B$ ?

4.1.16. У пластинки электрета поверхностная плотность связанных зарядов равна  $4,42 \cdot 10^{-6}$  Кл/м<sup>2</sup>, диэлектрическая проницаемость равна 3. Толщина пластинки 1 мм. Пластинка помещена между обкладками конденсатора, расположенными на расстоянии 1,5 мм и имеющими площадь 5 см<sup>2</sup> (см. рисунок). Чему равна плотность зарядов на верхнем электроде (см. рисунок)?



4.1.17. У пластинки электрета поверхностная плотность связанных зарядов равна  $4,42 \cdot 10^{-6}$  Кл/м<sup>2</sup> диэлектрическая проницаемость равна 3. Толщина пластинки 1 мм. Пластинка помещена между обкладками конденсатора, электроды которого закорочены (ключ  $K$  замкнут, см. рисунок) и плотно прижаты к поверхностям электрета (расстояние  $h_1 = 0$ ). Площадь электродов 5 см<sup>2</sup>. Чему равна разность потенциалов между электродами, если сначала разомкнуть ключ  $K$ , а затем поднять верхний электрод на расстояние 1,2 мм над поверхностью электрета? Окружающая среда - воздух при нормальных условиях. *Примечание.* При решении рекомендуется использовать формулу плоского конденсатора и



формулу для вычисления эффективной диэлектрической проницаемости неоднородного диэлектрика. Возможны и другие способы решения.

- 4.1.18. Из кристалла пьезоэлектрического кварца вырезана перпендикулярно электрической оси  $X$  пластинка толщиной 1 мм. Вдоль этой оси пьезомодуль продольного пьезоэффекта  $d_{11}=2,3 \cdot 10^{-12}$  Кл/Н. Если механическое напряжение, равное  $10^5$  Н/м<sup>2</sup>, направлено вдоль оси  $X$ , то чему будет равна разность электрических потенциалов между противоположными плоскостями пластинки? Диэлектрическая проницаемость кварца  $\varepsilon = 4,5$ .

## 5 Оптическое бесцветное неорганическое стекло.

Оптическое стекло – прозрачное стекло специального состава, используемое для изготовления различных деталей оптических приборов. От обычного технического стекла отличается особенно высокой прозрачностью, чистотой, бесцветностью, однородностью, а также строго нормированными преломляющей способностью, дисперсией.

### 5.1 Оптические постоянные бесцветного неорганического стекла. Диаграмма Аббе

Основными оптическими постоянными оптического стекла являются: *показатель преломления -  $n_\lambda$ , средняя дисперсия –  $(n_{\lambda 3} - n_{\lambda 2})$ , коэффициент дисперсии  $\nu_{\lambda 1}$ .*

Система понятий и терминология, используемые в прикладной оптике и технологии оптических материалов, была создана во второй половине девятнадцатого века усилиями немецкого ученого Эрнста Аббе.

Показатель преломления  $n_\lambda$  определяется как отношение скорости распространения электромагнитного излучения в воздухе к скорости его распространения в стекле. Показатель преломления зависит от длины волны излучения.

Для того чтобы гарантировать точность привязки измеряемых значений к шкале длин волн, измерения показателя преломления бесцветных оптических материалов выполняются для определенных спектральных линий, возбуждаемых электрическим разрядом в парах различных элементов. Длины волн, соответствующие этим спектральным линиям, измерены с очень низкой погрешностью. Наиболее часто используемые спектральные линии перечислены в табл. 5.1.

Таблица 5.1.

Длины волн и буквенные обозначения спектральных линий, используемых при измерении показателя преломления бесцветных оптических материалов

Длина волны, нм	Символ линии	Химический элемент
365,0146	i	Hg
404,6561	h	Hg
435,8343	g	Hg
479,9914	F'	Cd
486,1327	F	H
546,0740	e	Hg
587,5618	d	He
589,2938	D	Na*)
643,8469	C'	Cd
656,2725	C	H
706,5188	r	He
852,1100	s	Cs
1013,980	t	Hg

Главный показатель преломления  $n_{\lambda_1}$  – это значение показателя преломления при некоторой фиксированной длине волны  $\lambda_1$ , расположенной примерно посередине видимого диапазона. Во времена Аббе в качестве главного показателя преломления было принято его значение для желтой D-линии натрия,  $n_D$ . Однако в дальнейшем выяснилось, что это не одиночная линия, а тесный дублет, и положение центра этого дублета измеряется, естественно, с гораздо меньшей точностью, чем положение одиночных линий. Поэтому в качестве главного показателя преломления стали принимать его значение для желто-зеленой e-линии ртути,  $n_e$  (так было принято во французской фирме Sovirel, позднее поглощенной фирмой Corning, США, и в документации российских производителей).

Средняя дисперсия  $n_{\lambda_3} - n_{\lambda_2}$  – это разность двух значений показателя преломления при некоторых фиксированных длинах волн  $\lambda_2$  и  $\lambda_3$ , расположенных по краям видимого диапазона. Во времена Аббе в качестве средней дисперсии была принята разность  $n_F - n_C$  для голубой и красной линий водорода (табл.6.1). В дальнейшем группа производителей, переходившая на использование главного показателя преломления  $n_e$ , перешла одновременно и на использование средней дисперсии  $n_{F'} - n_{C'}$ , где  $F'$  и  $C'$  – голубая и красная линии кадмия, очень близкие по положению на шкале длин волн к вышеуказанным линиям.

Коэффициент дисперсии –  $v_{\lambda_1}$ , задается выражением:

$$v_{\lambda_1} = (n_{\lambda_1} - 1) / (n_{\lambda_3} - n_{\lambda_2}) \quad (5.1)$$

где  $n_2$  и  $n_3$  – показатели преломления для длин волн, ограничивающих какой-либо диапазон спектра, а  $n_1$  – показатель преломления для длины волны, расположенной внутри диапазона. Для видимого диапазона во времена Аббе

было принято представлять коэффициент дисперсии (число Аббе) в виде  $\nu_D = (n_D - 1)/(n_F - n_C)$ , а в настоящее время основными коэффициентом дисперсии (число Аббе) –  $\nu_e = (n_e - 1)/(n_F - n_C)$ .

### **Частные дисперсии и относительные частные дисперсии**

*Частные дисперсии* – это разности  $n_{\lambda_4} - n_{\lambda_5}$  двух значений показателя преломления при некоторых произвольно выбранных длинах волн  $\lambda_4$  и  $\lambda_5$ , не совпадающих с длинами волн  $\lambda_2$  и  $\lambda_3$ , выбранными для расчёта средней дисперсии (и как правило, с более узким спектральным интервалом).

*Относительные частные дисперсии*  $P_{\lambda_4\lambda_5}$  – это отношения частных дисперсий к средней дисперсии.

$$P_{\lambda_4\lambda_5} = \frac{n_{\lambda_4} - n_{\lambda_5}}{n_{\lambda_2} - n_{\lambda_3}}$$

Частные дисперсии и относительные частные дисперсии служат для детализации зависимости изменений показателя преломления стекла от изменений длины волны. Такая детализация необходима при расчёте высококачественных ахроматических и апохроматических компонентов, поскольку учёт хода относительных дисперсий, на этапе выбора стёкол, позволяет в дальнейшем значительно уменьшить вторичный спектр.

Оптические бесцветные стекла классифицируют по типам в зависимости от значений показателя преломления и коэффициента дисперсии. Марка присваивается стеклам определенного типа, имеющим различный химический состав и оптические характеристики. Обозначение марки содержит буквенное наименование типа стекла, порядковый номер. Для обозначения марок стекол используют также код, представляющий собой шестизначную цифру, в которой первые три цифры соответствуют трем цифрам после запятой значение показателя преломления  $n_e$ , вторые три – трем цифрам значения коэффициента дисперсии  $\nu_e$ . Например, ТФ5 или 762273 – стекло типа тяжелый флинт, имеющее пятый номер в этом типе, показатель преломления 1,76171, коэффициент дисперсии 27,32.

Для удобства выбора типов и марок стекол строится диаграмма Аббе в координатах  $n_e, \nu_e$ . Стекла каждого типа располагаются на поле диаграммы на строго ограниченных участках, за исключением стекол типа ОФ и ОК, которые могут находиться на разных участках

Диаграмма Аббе чрезвычайно удобна для совместного представления всех стекол каталога оптического стекла и других бесцветных материалов и для выбора пар оптических стекол, используемых для ахроматизации оптической системы. На этой диаграмме бесцветные оптические стёкла располагаются в виде широкой области, вытянутой от нижнего левого угла диаграммы к её правому верхнему углу. Таким образом, можно было увидеть взаимосвязь изменения двух основных оптических характеристик с химическим составом оптических стёкол. Причём, с возрастанием показателя преломления, коэффициент дисперсии, как правило, уменьшался.

В связи с этим были выделены два основных типа оптических стёкол: кроны (стёкла с низким показателем преломления и высокими значениями коэффициента дисперсии) и флинтсы (стёкла с низкими значениями коэффициента дисперсии и высоким показателем преломления). При этом к группе кронов относились натриево-силикатные стекла, а к группе флинтсов – стёкла, содержащие свинец.

В дальнейшем, в связи с ростом числа оптических стёкол, потребовалось делить диаграмму Аббе на большее число участков, соответствующих новым типам. Так, от кронов отделились лёгкие, тяжёлые и сверхтяжёлые кроны (ЛК, ТК, СТК), а от флинтсов – лёгкие, тяжёлые и сверхтяжёлые флинтсы (ЛФ, ТФ, СТФ). К тому же, между лёгкими кронами и лёгкими флинтсами появилась группа кронфлинтсов.

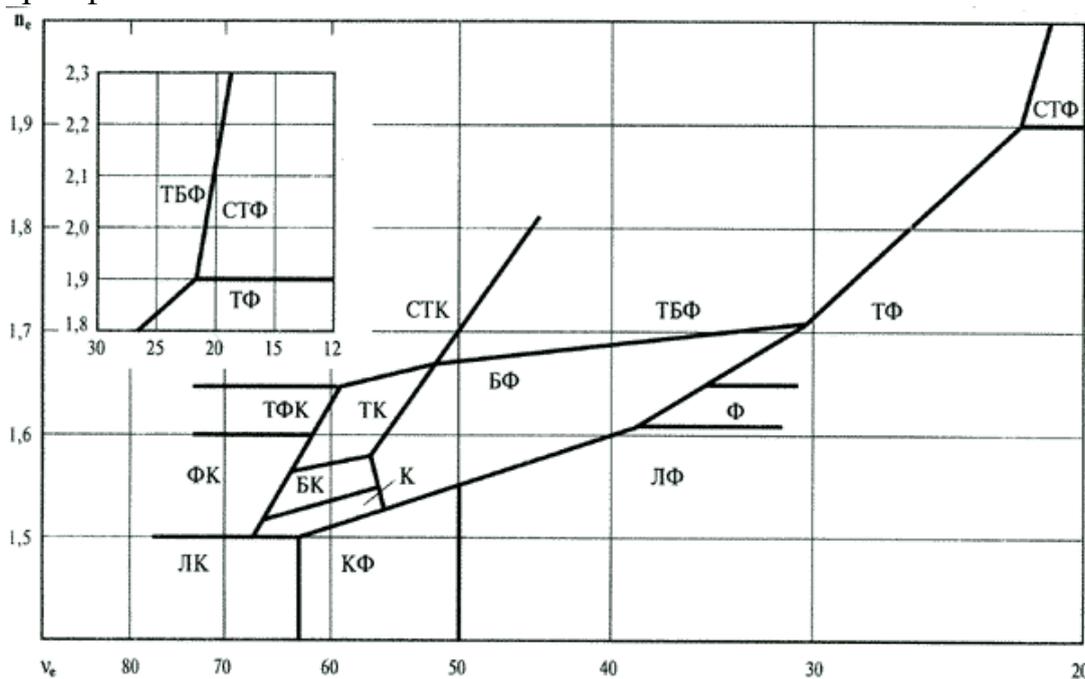


Рис. 5.1. Диаграмма Аббе

## 5.2 Бесцветное оптическое стекло. Механические свойства бесцветного неорганического стекла.

К механическим свойствам стекла относятся: плотность; упругость; прочность, твердость, удельная жесткость, фотоупругость.

**Цель** – научиться рассчитывать механические параметры оптического стекла.

### 5.2.1 Механические свойства бесцветного неорганического стекла

Стекла относятся к хрупким материалам. Их растрескивание обычно определяется внешними условиями, а не прочностью связей, образующих структурную сетку. Напряжение растрескивания стекол зависит от предыдущей обработки поверхности, внешних химических факторов и метода измерения напряжения. Кроме того, являясь хрупкими материалами, стекла подвержены разрушению в результате термического удара.

Другие механические свойства стекол зависят только от их собственной

природы. Модуль упругости  $E$  определяется типом связей и структурой сетки, а твердость является функцией прочности связей и плотности упаковки атомов в структуре.

К механическим свойствам стекла относятся: плотность; упругость; прочность, твердость, удельная жесткость, фотоупругость.

*Плотность  $\rho$  (г/см<sup>3</sup>)* - отношение массы стекла к его объему. Определяет массу заготовки и оптической детали, ее возможный прогиб под собственным весом, давление на опорные поверхности и т.п.

Упругие свойства материала позволяют определять деформацию деталей при обработке, креплении, от воздействия внешних факторов и характеризуются стандартными параметрами: модулем упругости ( $E$ , Па); модулем сдвига ( $G$ , Па); коэффициентом Пуассона ( $m$ ), связанными между собой соотношением  $E = 2G(1 + m)$ .

Сила растяжения или сжатия, приложенная к телу в форме стержня (или пластины), вызывает изменение длины тела  $\Delta l$ . Величина  $\Delta l$  зависит от размеров стержня, материала, из которого он изготовлен, и величины самой силы. Если  $l$  – начальная длина стержня,  $\Delta l$  – изменение длины под давлением внешней силы,

$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$  – относительное удлинение (линейная деформация),  $S$  –

площадь поперечного сечения стержня,  $F$  – сила,  $\sigma = \frac{F}{S}$  –

напряжение,  $E$  – модуль упругости (модуль Юнга), то согласно закону Гука

$$\frac{F}{S} = E \frac{\Delta l}{l} \text{ или } \sigma = E\varepsilon.$$

Таким образом, модуль упругости равен отношению приложенного напряжения к вызванному им относительному удлинению:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}.$$

Отношение деформации  $\varepsilon$  к приложенному напряжению  $\sigma$  является постоянной величиной. Она называется модулем упругости (модулем Юнга)  $E$  и определяется выражением:  $\sigma = E\varepsilon$ .

*Модуль упругости* характеризует изменение межатомных расстояний, происходящие в структуре под действием приложенной силы.

*Коэффициентом Пуассона* характеризует отношение поперечной и продольной деформации.

Механическое напряжение в продольном направлении кроме удлинения вызывает поперечное сжатие тела, т.е. с изменением длины тела изменяется его поперечное сечение. Если  $d$  – поперечный размер тела (диаметр, толщина стержня и т.д.),  $\Delta d$  – изменение поперечного сечения,  $\varepsilon_n = \frac{\Delta d}{d}$  – относительное изменение поперечного размера тела,  $l$  – длина тела,  $\Delta l$  – изменение длины тела,  $\mu$  – коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона), то эти величины связаны следующим соотношением:

$$\frac{\Delta d}{d} = -\mu \frac{\Delta l}{l} \text{ или } \varepsilon_n = -\mu \varepsilon.$$

Таким образом, коэффициент поперечной деформации равен отношению относительного изменения поперечного размера тела к относительному изменению его длины.

Для оксидных стекол он изменяется от 0,2 до 0,3, а для стеклообразного оксида кремния составляет только 0,17.

*Модуль сдвига* связывает деформацию сдвига с величиной напряжения сдвига.

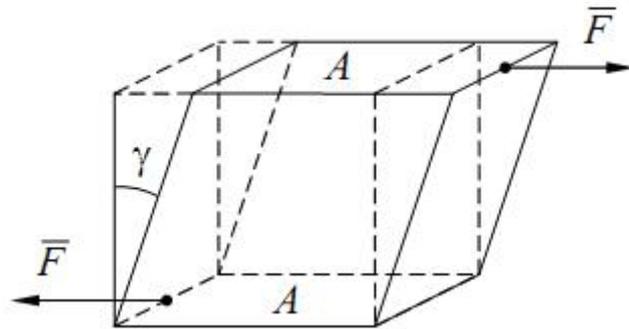


Рис. 5.2. Модуль сдвига

Пусть к параллельным плоскостям параллелепипеда или куба приложены параллельные силы, направленные в разные стороны, что приводит к смещению плоскостей относительно друг друга и к соответствующему наклону плоскостей, перпендикулярных направлению сил до их приложения, на угол сдвига  $\gamma$ . Если  $F$  – сила, параллельная плоскости  $A$ ,  $S$  – площадь поверхности  $A$ ,  $\tau$  – касательное напряжение,  $\gamma$  – сдвиговая деформация (угол сдвига),  $G$  – модуль сдвига, то по аналогии с законом Гука:  $\tau = F/S = G \cdot \gamma$

Модуль сдвига можно определить, используя другие упругие постоянные:  $G = \frac{E}{2(1 + \mu)}$ .

Наилучшими считаются материалы, обладающие максимальными упругими характеристиками.

*Прочность* – способность выдерживать нагрузки без разрушения, характеризуется значениями предельных напряжений ( $s$ , Па) на сжатие,

растяжение, изгиб. Заметим, что оптическое стекло (наиболее часто используемое для изготовления оптических деталей) обладая сравнительно высокой прочностью на сжатие, имеет значения предельного напряжения на растяжение в 15-20 раз хуже, чем на сжатие.

## 5.2.2 Задачи для самостоятельного решения

- 5.2.1 Построить диаграмму Аббе по данным каталога для бесцветного оптического стекла, приведенным на сайтах:  
[http://www.ipz.com.ua/index.php?option=com\\_content&view=article&id=111:2012-05-17-08-18-48&catid=53:2012-05-17-08-04-04&Itemid=88](http://www.ipz.com.ua/index.php?option=com_content&view=article&id=111:2012-05-17-08-18-48&catid=53:2012-05-17-08-04-04&Itemid=88)  
<http://studopedia.org/2-35092.html>
- 5.2.2 По диаграмме Аббе определить марку стекла, имеющего  $n_e=1,5784$  и  $\nu_e = 41.31$
- 5.2.3 Для ахроматизации оптической системы необходимо стекло с показателем преломления  $n_e > 1,75$  и числом Аббе  $\nu_e < 30$ . Пользуясь диаграммой Аббе, выберите нужное стекло.
- 5.2.4 К легким кронам относятся стекла с коэффициентом преломления и коэффициентом дисперсии (указать диапазон по диаграмме Аббе).
- 5.2.5 Для ахроматизации оптической системы необходимо стекло с показателем преломления  $1,57 < n_e < 1,68$  и числом Аббе  $40 < \nu_e < 50$ . Какое стекло вы выберете?
- 5.2.6 По диаграмме Аббе определить марку стекла, имеющего  $n_e=1,695$  и  $\nu_e = 54.79$ .
- 5.2.7 К легким флинтам относятся стекла с коэффициентом преломления и коэффициентом дисперсии (указать диапазон по диаграмме Аббе).
- 5.2.8 По диаграмме Аббе определить марку стекла, имеющего  $n_e=1,5784$  и  $\nu_e = 41.31$ .
- 5.2.9 К фосфатным кронам относятся стекла с коэффициентом преломления и коэффициентом дисперсии (указать диапазон по диаграмме Аббе).
- 5.2.10 Для стекла марки ЛК 3 рассчитать среднюю дисперсию и коэффициент дисперсии (число Аббе  $\nu_e$ ), модуль упругости и удельную жесткость. Рассчитать показатель преломления для  $e$  линии при температуре 100 °С. Необходимые данные приведены в таблице.

Показатель преломления и механические характеристики для стекла марки ЛК3

Длина волны, нм	Символ	Хим. элемент	ЛК 3	Плотность, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	2,46
365,0146	i	Hg	1,50414	Модуль сдвига, $G$ , Па	$2569 \cdot 10^7$
404,6561	h	Hg	1,49900	Коэффициент Пуассона (коэффициент поперечной деформации), $m$	0,228
435,8343	g	Hg	1,49596		
479,9914	F'	Cd	1,49264	Температурный коэффициент показателя преломления, $K^{-1}$	$-15 \cdot 10^{-7}$
486,1327	F	H	1,49226		
546,0740	e	Hg	1,48911		
587,5618	d	He	1,48746		
589,2938	D	Na*)	1,48740		
643,8469	C'	Cd	1,48566		
656,2725	C	H	1,48530		
706,5188	r	He	1,48407		
852,1100	s	Cs	1,48118		
1013,980	t	Hg	1,47928		

5.2.11 Пользуясь приведенной таблицей, рассчитать модуль сдвига и удельную жесткость, среднюю дисперсию и коэффициент дисперсии (число Аббе  $v_e$ ) для стекла марки К8. Рассчитать показатель преломления для  $d$  линии при температуре 110 °С. Необходимые данные приведены в таблице. Показатель преломления и механические характеристики для стекла марки К8

Длина волны, нм	Символ	Хим. элемент	К 8	Плотность, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	2,52
365,0146	i	Hg	1,53582	Модуль упругости, $E$ , Па	$8065 \cdot 10^7$
404,6561	h	Hg	1,52982	Коэффициент Пуассона (коэффициент поперечной деформации), $m$	0,209
435,8343	g	Hg	1,52626		
479,9914	F'	Cd	1,52238	Температурный коэффициент показателя преломления, $K^{-1}$	$24 \cdot 10^{-7}$
486,1327	F	H	1,52195		
546,0740	e	Hg	1,51829		
587,5618	d	He	1,51637		
589,2938	D	Na*)	1,51630		
643,8469	C'	Cd	1,51430		
656,2725	C	H	1,51389		
706,5188	r	He	1,51248		
852,1100	s	Cs	1,50918		
1013,980	t	Hg	1,50707		

5.2.12 Для стекла марки БК 4 рассчитать среднюю дисперсию и коэффициент дисперсии (число Аббе  $v_e$ ), коэффициент Пуассона и удельную жесткость. Рассчитать показатель преломления для  $F$  линии при температуре 90 °С. Необходимые данные приведены в таблице. Показатель преломления и механические характеристики для стекла марки БК 4

Длина волны, нм	Символ	Хим. элемент	БК 4	Плотность, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	2,76
365,0146	i	Hg	1,55180	Модуль упругости, $E$ , Па	7027·10 <sup>7</sup>
404,6561	h	Hg	1,54508		
435,8343	g	Hg	1,54112	Модуль сдвига, $G$ , Па	2865·10 <sup>7</sup>
479,9914	F'	Cd	1,53687		
486,1327	F	H	1,53637		
546,0740	e	Hg	1,53236	Температурный коэффициент показателя преломления, К <sup>-1</sup>	20·10 <sup>-7</sup>
587,5618	d	He	1,53027		
589,2938	D	Na*)	1,53020		
643,8469	C'	Cd	1,52803		
656,2725	C	H	1,52760		
706,5188	r	He	1,52608		
852,1100	s	Cs	1,52267		
1013,980	t	Hg	1,52056		

5.2.13 Для стекла марки СТК 3 рассчитать среднюю дисперсию и коэффициент дисперсии (число Аббе  $v_e$ ), модуль упругости и удельную жесткость. Рассчитать показатель преломления для  $D$  линии при температуре 90 °С. Необходимые данные приведены в таблице. Показатель преломления и механические характеристики для стекла марки СТК 3

Длина волны, нм	Символ	Хим. элемент	СТК 3	Плотность, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	3,91
365,0146	i	Hg	1,68789	Модуль сдвига, $G$ , Па	3449·10 <sup>7</sup>
404,6561	h	Hg	1,67896		
435,8343	g	Hg	1,67376	Коэффициент Пуассона (коэффициент поперечной деформации), $\mu$	0,283
479,9914	F'	Cd	1,66816		
486,1327	F	H	1,66750		
546,0740	e	Hg	1,66223	Температурный коэффициент показателя преломления, К <sup>-1</sup>	-4·10 <sup>-7</sup>
587,5618	d	He	1,65950		
589,2938	D	Na*)	1,65940		
643,8469	C'	Cd	1,65656		
656,2725	C	H	1,65600		
706,5188	r	He	1,65402		
852,1100	s	Cs	1,64962		
1013,980	t	Hg	1,64694		

5.2.14 Пользуясь приведенной таблицей, рассчитать модуль сдвига и удельную жесткость, среднюю дисперсию и коэффициент дисперсии (число Аббе  $v_e$ ) для стекла марки ТК2. Рассчитать показатель преломления для  $e$  линии при температуре 100 °С. Необходимые данные приведены в таблице. Показатель преломления и механические характеристики для стекла марки ТК 2

Длина волны, нм	Символ	Хим. элемент	ТК 2
365,0146	i	Hg	1,59716
404,6561	h	Hg	1,58941
435,8343	g	Hg	1,58487
479,9914	F'	Cd	1,58000
486,1327	F	H	1,57942
546,0740	e	Hg	1,57486
587,5618	d	He	1,57248
589,2938	D	Na*)	1,57240
643,8469	C'	Cd	1,56994
656,2725	C	H	1,56946
706,5188	r	He	1,56775
852,1100	s	Cs	1,56395
1013,980	t	Hg	1,56195

Плотность, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	3,20
Модуль упругости, $E$ , Па	$7203 \cdot 10^7$
Коэффициент Пуассона (коэффициент поперечной деформации), $\mu$	0,247
Температурный коэффициент показателя преломления, $K^{-1}$	$30 \cdot 10^{-7}$

5.2.15 Для стекла марки КФ 4 рассчитать среднюю дисперсию и коэффициент дисперсии (число Аббе  $v_e$ ), коэффициент Пуассона и удельную жесткость. Рассчитать показатель преломления для  $d$  линии при температуре 120 °С. Необходимые данные приведены в таблице. Показатель преломления и механические характеристики для стекла марки КФ 4

Длина волны, нм	Символ	Хим. элемент	КФ 4
365,0146	i	Hg	1,53982
404,6561	h	Hg	1,53302
435,8343	g	Hg	1,52904
479,9914	F'	Cd	1,52478
486,1327	F	H	1,52428
546,0740	e	Hg	1,52027
587,5618	d	He	1,51817
589,2938	D	Na*)	1,51810
643,8469	C'	Cd	1,51592
656,2725	C	H	1,51549
706,5188	r	He	1,51395
852,1100	s	Cs	1,51049

Плотность, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	2,57
Модуль упругости, $E$ , Па	$7036 \cdot 10^7$
Модуль сдвига, $G$ , Па	$2903 \cdot 10^7$
Температурный коэффициент показателя преломления, $K^{-1}$	$34 \cdot 10^{-7}$

5.2.16 Для стекла марки БФ 1 рассчитать среднюю дисперсию и коэффициент дисперсии (число Аббе  $v_e$ ), модуль упругости и удельную жесткость. Рассчитать показатель преломления для  $F$  линии при температуре 80 °С. Необходимые данные приведены в таблице. Показатель преломления и механические характеристики для стекла марки БФ 1

Длина волны, нм	Символ	Хим. элемент	БФ 1	Плотность, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	2,67
365,0146	i	Hg	1,54879	Модуль сдвига, $G$ , Па	2839·10 <sup>7</sup>
404,6561	h	Hg	1,54111		
435,8343	g	Hg	1,53670	Коэффициент Пуассона (коэффициент поперечной деформации), $m$	0,203
479,9914	F'	Cd	1,53198		
486,1327	F	H	1,53144		
546,0740	e	Hg	1,52706		
587,5618	d	He	1,52478		
589,2938	D	Na*)	1,52470		
643,8469	C'	Cd	1,52236		
656,2725	C	H	1,52189		
706,5188	r	He	1,52087	Температурный коэффициент показателя преломления, К <sup>-1</sup>	32·10 <sup>-7</sup>
852,1100	s	Cs	1,51664		
1013,980	t	Hg	1,51441		

5.2.17 Пользуясь приведенной таблицей, рассчитать модуль сдвига и удельную жесткость. среднюю дисперсию и коэффициент дисперсии (число Аббе  $v_e$ ) для стекла марки БФ16. Рассчитать показатель преломления для  $D$  линии при температуре 110 °С. Необходимые данные приведены в таблице. Показатель преломления и механические характеристики для стекла марки БФ 16

Длина волны, нм	Символ	Хим. элемент	БФ 16	Плотность, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	4,02
365,0146	i	Hg	1,70771	Модуль упругости, $E$ , Па	7889·10 <sup>7</sup>
404,6561	h	Hg	1,69576		
435,8343	g	Hg	1,68897	Коэффициент Пуассона (коэффициент поперечной деформации), $m$	0,286
479,9914	F'	Cd	1,68180		
486,1327	F	H	1,68098		
546,0740	e	Hg	1,67438		
587,5618	d	He	1,67102		
589,2938	D	Na*)	1,67090		
643,8469	C'	Cd	1,66745		
656,2725	C	H	1,66679		
706,5188	r	He	1,66440	Температурный коэффициент показателя преломления, К <sup>-1</sup>	22·10 <sup>-7</sup>
852,1100	s	Cs	1,65927		
1013,980	t	Hg	1,65626		

5.2.18 Для стекла марки ТФ 1 рассчитать среднюю дисперсию и коэффициент дисперсии (число Аббе  $v_e$ ), модуль упругости и удельную жесткость. Рассчитать показатель преломления для  $F$  линии при температуре 80 °С. Необходимые данные приведены в таблице. Показатель преломления и механические характеристики для стекла марки ТФ 1

Длина волны, нм	Символ	Хим. элемент	ТФ 1	Плотность, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	3,86
365,0146	i	Hg	1,70022	Модуль упругости, $E$ , Па	$5361 \cdot 10^7$
404,6561	h	Hg	1,68229		
435,8343	g	Hg	1,67245	Модуль сдвига, $G$ , Па	$2184 \cdot 10^7$
479,9914	F'	Cd	1,66234		
486,1327	F	H	1,66118		
546,0740	e	Hg	1,65218		
587,5618	d	He	1,64766		
589,2938	D	Na*)	1,64750	Температурный коэффициент показателя преломления, $K^{-1}$	$42 \cdot 10^{-7}$
643,8469	C'	Cd	1,64295		
656,2725	C	H	1,64207		
706,5188	r	He	1,63900		
852,1100	s	Cs	1,63254		
1013,980	t	Hg	1,62892		

## 6 Органическое стекло

Семинар по теме «Органическое стекло».

Вопросы для обсуждения на семинаре:

1. Свойства органического стекла.
2. Способы получения органического стекла.
3. Применение органического стекла.

## 7 Стекла с особыми свойствами

### 7.1 Цветное оптическое стекло

Цветное оптическое стекло предназначено для изготовления светофильтров с избирательным поглощением светового излучения в широком диапазоне длин волн, которое формируется крупными границами в различных областях спектра, узкими и размытыми полосами поглощения и определяется природой центров окраски, т.е. различными типами электронных переходов.

**Цель** – научиться строить спектральные зависимости коэффициента пропускания цветных оптических стекол.

#### 7.1.1 Причины появления окраски стекол

Поглощение в видимой части спектра воспринимается как цвет. Существует несколько причин появления окраски стекол:

- окрашивание молекулярными красителями
- окрашивание металлами в коллоидном состоянии
- окрашивание полупроводниками в коллоидном состоянии
- окрашивание, вызванное облучением
- соляризация.

Маркировка цветного стекла состоит из букв и цифр. Цифра указывает порядковый номер марки стекла данного типа. Первая или две первых буквы являются начальными буквами наименования цвета. Так, например, надпись УФС 3 обозначает стекло, имеющее высокое пропускание в УФ области спектра N3.

В соответствии с ГОСТ9411-91 выпускаются цветные стёкла 14 типов: ультрафиолетовое (УФС), фиолетовое (ФС), синее (СС), сине-зеленое (СЗС), зеленое (ЗС), желто-зеленое (ЖЗС), оранжевое (ОС), красное (КС), инфракрасное (ИКС), пурпурное (ПС), нейтральное (НС), темное (ТС), бесцветное (БС).

Тип БС используют для ограничения пропускания цвета в ультрафиолетовой и длинноволновой инфракрасной областях спектра при сохранении пропускания в видимой части.

Заготовки из цветного стекла нормируются по следующим показателям качества: показателю поглощения; бесцветности; неоднородности окраски; пузырьности; двойному лучепреломлению.

### 7.1.2 Спектральная характеристика цветного стекла

Спектральная характеристика стекол выражается числовыми значениями показателя поглощения  $\alpha_\lambda$  или оптической плотности  $D_\lambda$ , для различных длин волн и спектральными кривыми коэффициента пропускания  $\tau_\lambda$ .

Показатель поглощения стекла для света длиной волны  $\lambda$  определяется из выражения:  $\alpha_\lambda = -\lg \tau_\lambda / l$ ,

где  $\tau_\lambda$  - коэффициент пропускания стекла толщиной  $l$  (мм) для монохроматического света длиной волны  $\lambda$ .

Оптическая плотность  $D_\lambda$  массы стекла для монохроматического света с длиной волны  $\lambda$  связана с показателем поглощения  $\alpha_\lambda$  и коэффициентом пропускания  $\tau_\lambda$  следующим образом:  $D_\lambda = -\lg \tau_\lambda = \alpha_\lambda l$ .

Характеристиками плоскопараллельной пластины является коэффициент внешнего пропускания  $T$ , измеряемый опытным путем,

$$T = I_T / I_0 ;$$

$I_0$  - падающий (исходный) поток оптического излучения;

$I_T$  - поток, прошедший через пластину.

### 7.1.3 Задачи для самостоятельного решения

Используя данные из каталога цветного оптического стекла (<http://www.chipmaker.ru/files/file/8455/>) построить:

- 1) спектр пропускания цветных стекол (по заданию преподавателя), то есть зависимость коэффициента пропускания от длины волны –  $\tau_{\lambda}(\lambda)$ ;
- 2) спектр поглощения –  $\alpha_{\lambda}(\lambda)$ , из полученной зависимости определите длину волны, соответствующую положению максимума полосы поглощения.
- 3) коэффициент поглощения  $\alpha_{\lambda}$  рассчитывается по формуле:  $\alpha_{\lambda} = \frac{1}{t}d$ , где  $d$  – оптическая плотность,  $t$  – толщина образца в см.

## **7.2 Фотохромное стекло. Инфракрасное стекло. Стеклокристаллические материалы**

Семинар по теме «Фотохромное стекло. Инфракрасное стекло. Стеклокристаллические материалы».

Вопросы для обсуждения на семинаре:

1. Свойства и основные характеристики фотохромных стекол.
2. Способы получения инфракрасного стекла.
3. Применение инфракрасного стекла.
4. Стеклокристаллические материалы.

## **8 Современные тенденции развития оптического материаловедения**

Семинар по теме «Современные тенденции развития оптического материаловедения».

Вопросы для обсуждения на семинаре:

1. Фотонные кристаллы.
2. Материалы с отрицательным показателем преломления.
3. Нанокристаллические материалы.

**Рекомендуемая литература**

1. Оптическое материаловедение: Учебное пособие / Симонова Г. В., Кистенева М. Г. – 2013. – 148 с. URL: <http://edu.tusur.ru/training/publications/2992>.
2. Оптические свойства твердых тел: Учебное пособие по дисциплине «Оптические свойства твердых тел» для магистров направления подготовки 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника» программы академической магистратуры «Проектирование и технология микро- и наноэлектронных средств» / Симонова Г. В., Кистенева М. Г. - 2016. 126 с.: URL: <http://edu.tusur.ru/publications/5935>
3. Введение в нелинейную оптику: Учебное пособие / Шандаров С. М. - 2012. 41 с.: URL: <http://edu.tusur.ru/publications/2059>.
4. Оптика: Учебное пособие для вузов / Г. С. Ландсберг. - 6-е изд., стереотип. - М.: Физматлит, 2006. - 848 с.: ил., табл. - Предм. указ.: с. 844-848. - ISBN 5-9221-0314-8. **(28)**
5. Курс общей физики: учебное пособие для втузов: В 3 т. / И. В. Савельев. - 7-е изд., стереотип. - СПб.: Лань, 2007 -. - (Лучшие классические учебники) (Классическая учебная литература по физике) (Учебники для вузов. Специальная литература). - ISBN 978-5-8114-0629-6. Т. 2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. - СПб.: Лань, 2007. - 496 с.: ил., портр., табл. - Предм. указ.: с. 493-496. - ISBN 978-5-8114-0631-9. **(148)**
6. Епифанов Г.И. Физика твердого тела: учебное пособие. – СПб.: Издательство «Лань», 2011. – 288 с. – ISBN: 978-5-8114-1001-9. URL: [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_cid=25&pl1\\_id=2023](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=2023).