

Методические указания по практическим занятиям  
по дисциплине «Оптические материалы и технологии производства  
оптических компонентов»

## Оглавление

Задание к практическим занятиям по разделам :«Взаимодействие оптического излучения с материальной средой» и по разделу « Свойства оптических материалов».....	3
Задание к практическим занятиям по разделам: «оптические волокна и их технологии» и «полимерные материалы».....	12
Задание к практическим занятиям по разделу «оптические стекла и их технологии».....	18
Задание к практическим занятиям по разделам: «Оптические монокристаллические материалы и их технологии» и «Оптические поликристаллические материалы и их технологии».....	31
Задание к практическим занятиям по разделам: «Полупроводниковые материалы», « Полимерные материалы» , «Фотонно-кристаллические материалы» .....	33
Литература .....	33

## Задание к практическим занятиям по разделам :«Взаимодействие оптического излучения с материальной средой» и по разделу « Свойства оптических материалов»

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

#### 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  $I_T$ .

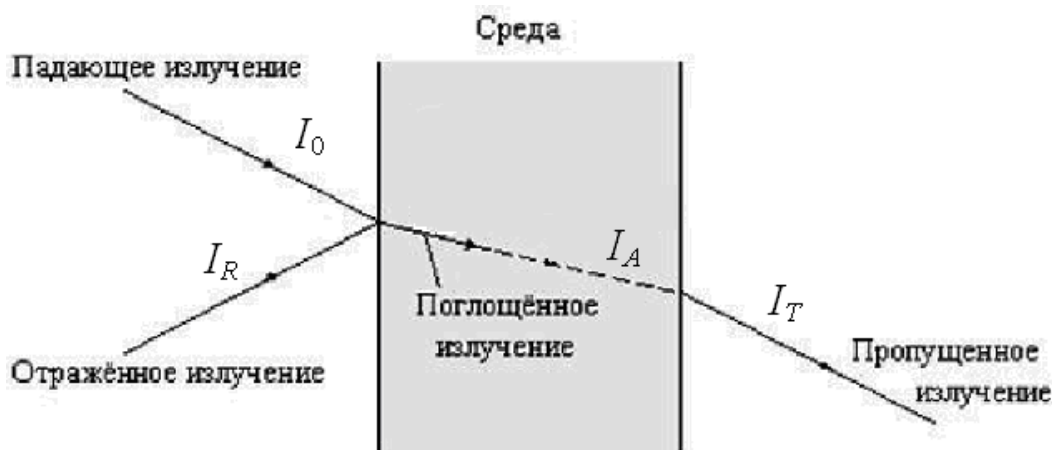


Рис. 2.1. Схема, иллюстрирующая оптические процессы, происходящие на поверхности среды и внутри неё

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

$I_R$  - отраженный поток;

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

$I_T$  - поток, прошедший через пластину;

В отсутствие 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 нижеследующее 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

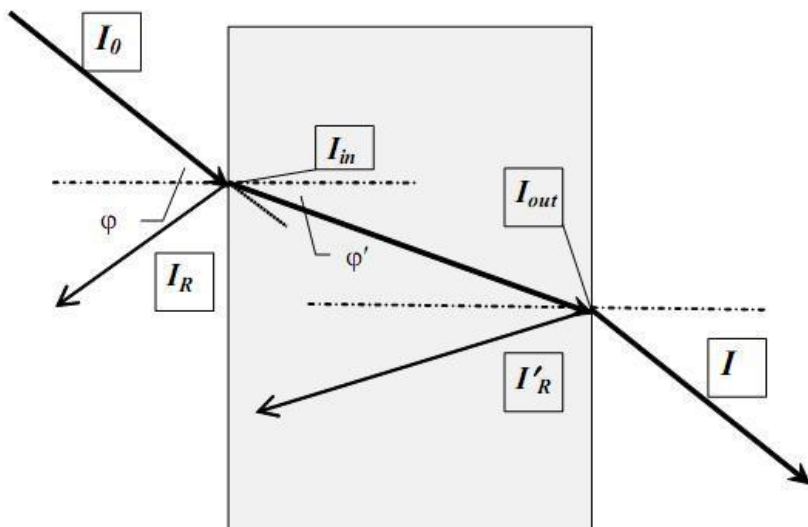


Рис. 2.2. Потoki излучения при прохождении монохроматического луча через пластину из этого материала.

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,

$$T = I_T / I_0; \tag{2.3}$$

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

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

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.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}},$$

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/с</u>	$L T^{-1}$
$\varepsilon_0$	Электрическая постоянная	$8.854 \times 10^{-12}$	<u>Ф / м</u>	$L^{-3} M^{-1} T^4 I^2$
$\mu_0$	Магнитная постоянная	$1.2 \times 10^{-6}$	<u>Гн / м</u>	$L M T^{-2} I^{-2}$

$$n = \sqrt{\varepsilon \mu}, \quad \mu = 1 \text{ (для немагнитных сред)}$$

$$\Rightarrow n = \sqrt{\varepsilon}.$$

## Примеры решения задач по теме «Отражение и пропускание света»

**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:*

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

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

$$I_{1B} = (1-R) \cdot TI_0, \text{ (в точке B, так как}$$

прошел через всю пластину 1),

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

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

C),

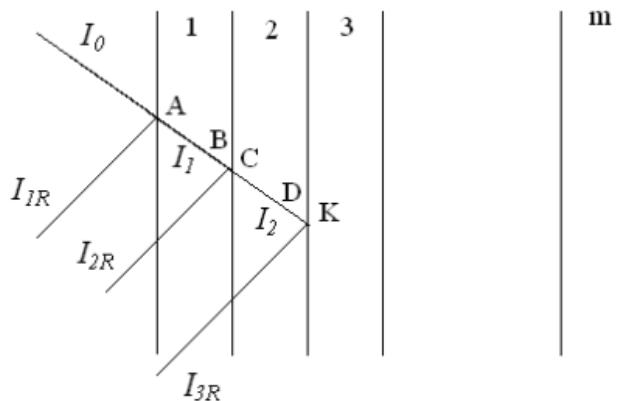
$$I_{3R} = R \cdot (1-R)^2 \cdot T^2 \cdot I_0 \text{ и т.д.}$$

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

$$T^m \cdot I_0,$$

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

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



**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:*

$$a := 1.502 \quad b := 0.004563$$

$$\lambda_1 := 380$$

$$l_2 := 980$$

$$n_1 := a + \frac{b \cdot 10^6}{\lambda_1^2} \quad n_1 = 1.534$$

$$n_2 := a + \frac{b \cdot 10^6}{l_2^2} \quad n_2 = 1.507$$

$$R_1 := \frac{(n_1 - 1)^2}{(n_1 + 1)^2} \quad R_1 = 0.044$$

$$R_2 := \frac{(n_2 - 1)^2}{(n_2 + 1)^2} \quad R_2 = 0.041$$

$$r_1 := 1 - (1 - R_1)^2 \quad r_1 = 0.087$$

$$r_2 := 1 - (1 - R_2)^2 \quad r_2 = 0.08$$

8.7%

8%

### **Задачи для самостоятельного решения по теме «Отражение и пропускание света»**

1. Найти коэффициент отражения света при нормальном падении на поверхность воды ( $n = 1,33$ ).
2. Определить коэффициенты отражения и пропускания при нормальном падении света из воды ( $n_1 = 1,33$ ) на стекло ( $n_2 = 1,5$ ).
3. Для некоторой длины волны света диэлектрическая проницаемость среды равна 2,323. Чему равен показатель преломления среды для этой длины волны?
4. Скорость света в некоторой среде равна  $2,386 \times 10^8$  м/с. Определить относительную диэлектрическую постоянную среды. Значение относительной магнитной проницаемости среды принять равной  $\mu = 1$ .
5. Монохроматический свет падает на две сложенные вместе стеклянные пластинки с показателями преломления  $n_1 = 1,5$  и  $n_2 = 1,8$ . Определить на какую долю уменьшится интенсивность прошедшего света за счет отражения от пластин (многократное отражение не учитывать).
6. Интенсивность монохроматической световой волны, падающей на стеклянную пластинку с показателем преломления  $n = 1,5$ , равна  $300$  лм/м<sup>2</sup>. Определить интенсивность отраженной волны. Учитывать отражение от двух границ раздела.
7. Найти коэффициент пропускания при нормальном падении света из воздуха на стекло, показатель преломления которого равен  $n = 1,5$ .
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  $d$ . Определить интенсивность света, прошедшего через пластинку, при условии, что поглощение в пластинке отсутствует.
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).
10. Скорость света в некоторой среде равна  $2,386 \times 10^8$  м/с. Определить

относительную диэлектрическую постоянную среды. Значение относительной магнитной проницаемости среды принять равной  $\mu = 1$ .

11. Монохроматический свет падает на две сложенные вместе стеклянные пластинки с показателями преломления  $n_1 = 1,5$  и  $n_2 = 1,8$ . Определить на какую долю уменьшится интенсивность прошедшего света за счет отражения от пластин (многократное отражение не учитывать).

12. Определить коэффициенты отражения и пропускания при нормальном падении света из воды ( $n_1 = 1,33$ ) на стекло ( $n_2 = 1,5$ ).

13. Интенсивность монохроматической световой волны, падающей на стеклянную пластинку с показателем преломления  $n = 1,5$ , равна  $300 \text{ лм/м}^2$ . Определить интенсивность отраженной волны. Учитывать отражение от двух границ раздела.

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?

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  $b = 0,004563 \text{ мкм}^2$  – константы. Вычислить показатели преломления для длин волн красной части видимого спектра  $l_k = 780 \text{ нм}$  и фиолетовой части  $l_\phi = 380 \text{ нм}$ .

16. Определить относительную диэлектрическую постоянную среды, в которой скорость света равна  $1,945 \times 10^8 \text{ м/с}$ . Значение относительной магнитной проницаемости среды принять равной  $\mu = 1$ .

17. Скорость света в некоторой среде равна  $2,386 \times 10^8 \text{ м/с}$ . Определить относительную диэлектрическую постоянную среды. Значение относительной магнитной проницаемости среды принять равной  $\mu = 1$ .



## 2 Поглощение света

### 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

$$R = \frac{\hat{I}_R}{I_0}.$$

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.3.3). Количество световой энергии  $dI$ , поглощенное слоем  $dx$ , пропорционально интенсивности света, падающего на этот слой  $I$ , и его толщине  $dx$ ,

Рис. 3.3. Поглощение света в кристалле

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

$$\frac{dI}{dx} = -kI \tag{3.1}$$

Знак минус указывает на убыль энергии. Интегрируя уравнение (3.1), имеем

$$\begin{aligned} \frac{dI}{I} &= -kdx, \\ \ln I &= -kx + \ln C, \text{ и далее} \\ I &= Ce^{-kx}. \end{aligned} \tag{3.2}$$

Используя начальное условие  $I(0) = I_0$ , найдем константу интегрирования  $C$ , которая равна  $C = I_0$ . Тогда уравнение (3.2) принимает вид

$$I = I_0 e^{-kx}. \tag{3.3}$$

В уравнении (3.3) коэффициент  $k$  имеет размерность, обратную длине, и носит название линейного коэффициента поглощения. Как видно из уравнения (3.3) коэффициент поглощения – это величина, равная обратной величине толщины пластинки, при которой интенсивность света ослабляется в  $e$  раз (рис.3.2).

Однако, уравнение (3.3) описывает лишь частный случай. Если отражением света пренебречь нельзя, то пользоваться формулой (3.3) 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  $\exp(-kd)$  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

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

$$I_0$$

### Примеры решения задач по теме «Закон Бугера»

**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 толщи пластины.

*Решение:*

$$k = ax + b, \quad b = 0,8, \quad a = 4 \quad (\text{находятся из условий задачи})$$

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

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

$$I/I_0 = 0,905$$

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

(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:*

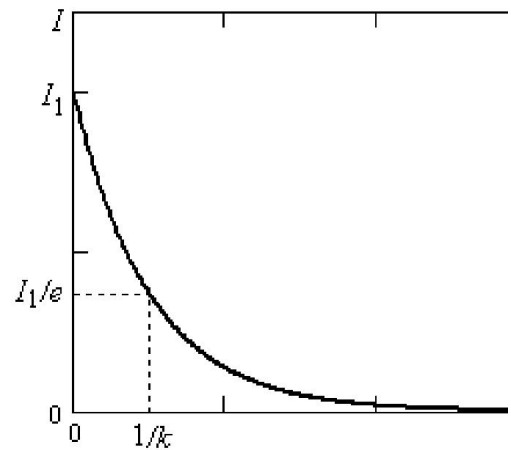


Рис. 3.2. Зависимость интенсивности прошедшего через образец света от толщины кристалла

$$(3.4)$$

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

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

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

### Задачи для самостоятельного решения по теме «Закон Бугера»

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. 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?

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  $3L$ ?

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) 5 мм; б) 4,6 м?

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.

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.

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.

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.

9. На сколько процентов уменьшается интенсивность света при прохождении им оконного стекла толщиной 4 мм за счет поглощения? Коэффициент поглощения равен  $1,23 \text{ м}^{-1}$ .

10. Во сколько раз уменьшение интенсивности света при прохождении

через стеклянную пластинку толщиной  $d = 2$  мм за счет отражения превосходит уменьшение интенсивности за счет поглощения, если показатель преломления  $n = 1,5$  и коэффициент поглощения  $k = 1,2 \text{ м}^{-1}$ ?

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  $n = 1,52$ .

12. Стеклянная пластина толщиной  $d = 3,82$  мм, пропускает 88,2 % упавшего на нее света. Определить коэффициент поглощения стекла для данной длины волны.

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.

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.

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.

16. Интенсивность монохроматической волны прошедшей через прозрачную пластинку толщиной 10 см уменьшилась на 20 %. Определить коэффициент поглощения.

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?

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.

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.

## **Задание к практическим занятиям по разделам: «оптические волокна и их технологии» и «полимерные материалы».**

### **3. 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. 4.1. 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.

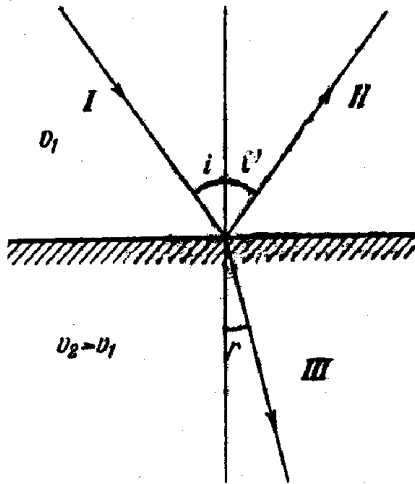


Рисунок 4.1

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

1. Угол падения равен углу отражения:

$$i = i' \quad (4.1)$$

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

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \text{const} \quad (4.2)$$

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

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n_{12}, \quad (4.3)$$

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:

$$n_{12} = n_2 / n_1 \quad (4.4)$$

С учетом соотношения (4.4) закон преломления можно записать в симметричной форме:

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r \quad (4.5)$$

Из этой симметрии следует обратимость световых лучей. Если обратить направление луча **III** на рис. 4.1. 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 (4.5) 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 принять показатель преломления  $n = -n_1$ . Подставляя  $-n_1$  в равенство (4.5), 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  $i_{пред}$ , при котором преломленный луч направлен вдоль границы раздела сред, согласно (4.5):

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

Следовательно, при  $i > i_{пред}$  преломление прекращается и остается лишь отраженный луч (рис. 4.2) Это явление носит название полного внутреннего отражения.

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

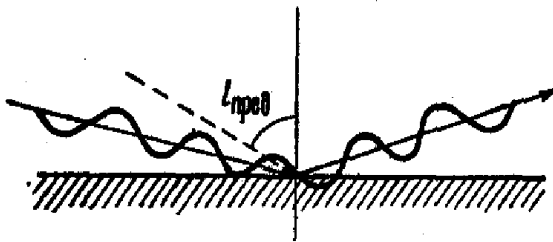


Рисунок 4.2

*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 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.

### **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.*

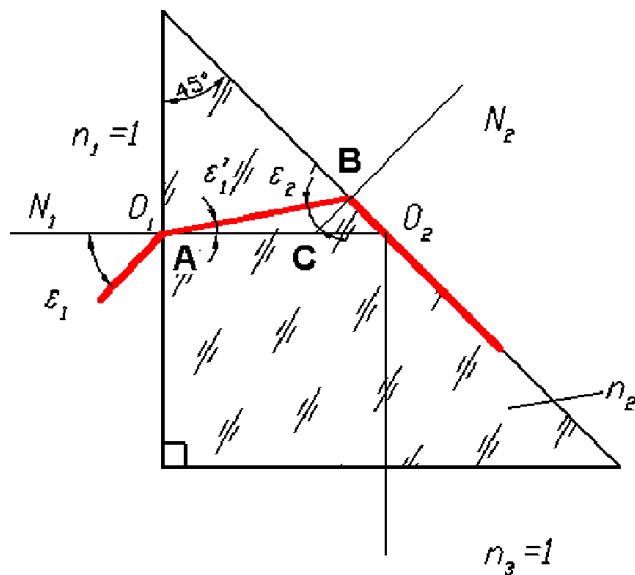
По соотношениям для угла полного внутреннего отражения

$$n_1 \sin i_{\text{пред}} = n_2.$$

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 нормальными 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:*  $\varepsilon_1 = 5^\circ 50'$ .

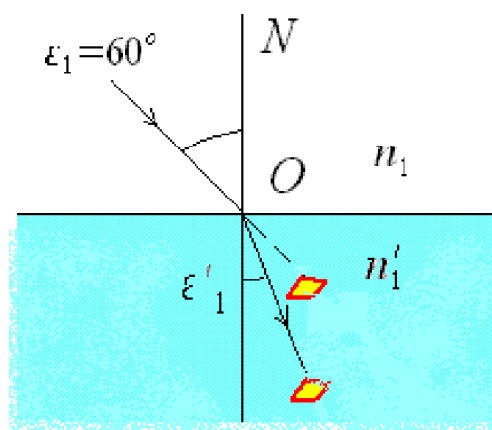
**Задача 4.** Объект, находящийся в воде, виден под углом  $60^\circ$ . Определить угол наклона преломленного луча в воде, если показатель преломления  $n = 1,33$ .

*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  $\varepsilon'_1 = 40^\circ 30'$ .

### **Задачи для самостоятельного решения по теме «Эффект полного внутреннего отражения как частный случай закона преломления»**

1. На кварцевую пластинку, имеющую показатель преломления 1.54, падает световой луч. Чему равен угол падения, если отраженный и преломленный лучи взаимно перпендикулярны?
2. Луч падает под углом  $60^\circ$  на стеклянную пластинку толщиной 3 см. Определить боковое смещение луча после выхода из пластинки.
3. Предельный угол полного внутреннего отражения для бензола  $\alpha = 42^\circ$ . Определить скорость света в бензоле.
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?
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.
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.
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?
8. Показатель преломления первой среды  $n_1 = 2$ . Угол полного внутреннего отражения равен  $45^\circ$ . Определить диэлектрическую проницаемость второй среды.
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.
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?
11. Показатель преломления первой среды  $n_1 = 2$ , второй  $n_2 = 1$ . При каком наименьшем угле падения (в градусах) возможно явление полного внутреннего отражения?
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?

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.

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.

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?

## Задание к практическим занятиям по разделу «оптические стекла и их технологии»

### Показатель преломления

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 линии перечислены в табл. 5.1.

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

Таблица 5.1.

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

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

Главный показатель преломления  $n_{\lambda_1}$  - это показатель 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.1.3.1). 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  $v_D = (n_D - 1)/(n_F - n_C)$ , а в настоящее время основными коэффициентом дисперсии (число Аббе) -  $v_e = (n_e - 1)/(n_{F'} - n_{C'})$ .

### **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*  $R_{\lambda_4\lambda_5}$  - это отношения частных дисперсий к средней дисперсии.

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

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 значения показателя преломления  $n_e$ , вторые три – трем цифрам значения коэффициента дисперсии  $v_e$ . 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  $n_e$ ,  $v_e$ . 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 флинты (стёкла с низкими значениями коэффициента дисперсии и высоким показателем преломления). При этом к группе кронов относились натриево-силикатные стекла, а к группе флинтов – 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 флинтов – лёгкие, тяжёлые и сверхтяжёлые флинты (ЛФ, ТФ, СТФ). К тому же, между лёгкими кронами и лёгкими флинтами появилась группа кронфлинтов.

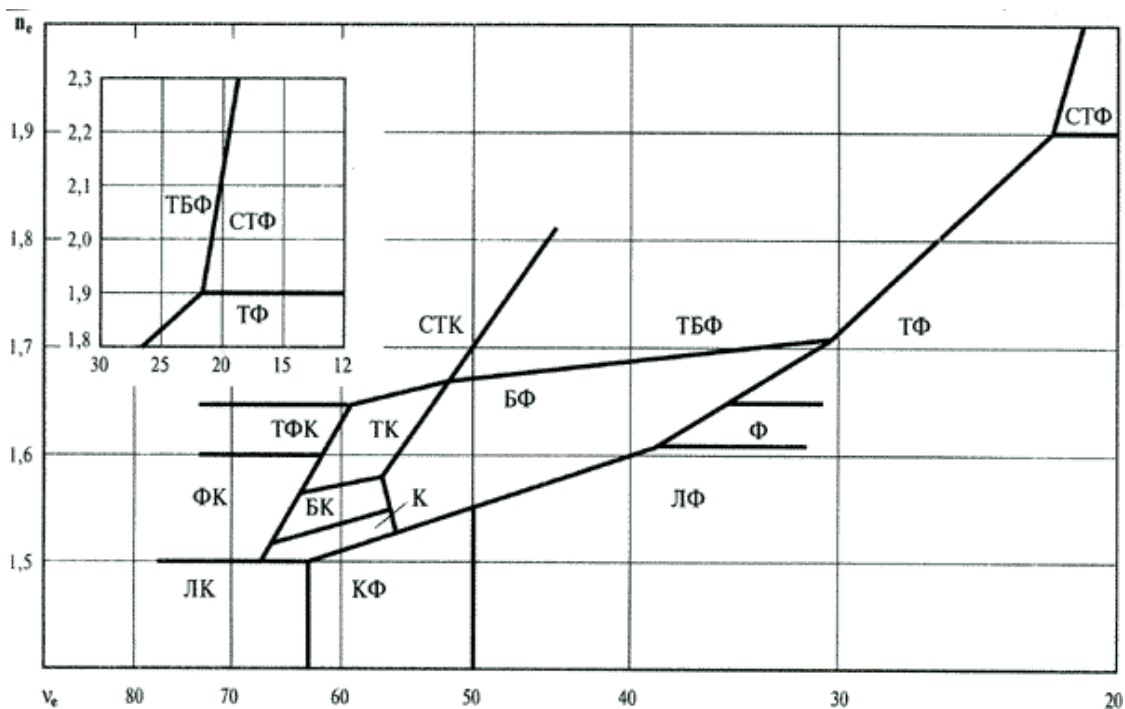


Рис. 5.1. Диаграмма Аббе

## 5.1 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.

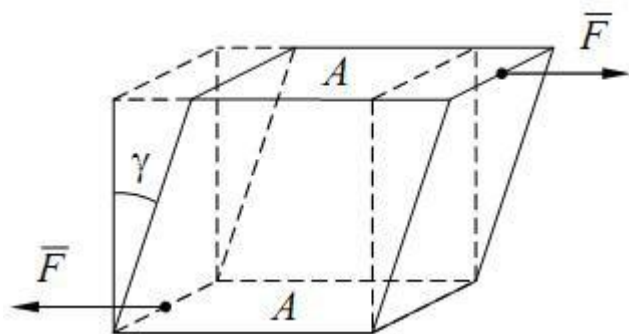


Рис. 5.2. Модуль сдвига

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.

### Задачи для самостоятельного решения по теме «Оптическое бесцветное неорганическое стекло»

1. По диаграмме Аббе определить марку стекла, имеющего  $n_e = 1,5784$  и  $\nu_e = 41,31$

2. Для ахроматизации оптической системы необходимо стекло с показателем преломления  $n_e > 1,75$  и числом Аббе  $\nu_e < 30$ . Какое стекло вы выберите?

3. К легким кронам относятся стекла с коэффициентом преломления и коэффициентом дисперсии (указать диапазон по диаграмме Аббе).

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 выберите?

4. По диаграмме Аббе определить марку стекла, имеющего  $n_e = 1,695$  и  $\nu_e = 54,79$ .

5. К легким флинтам относятся стекла с коэффициентом преломления и коэффициентом дисперсии (указать диапазон по диаграмме Аббе).

6. По диаграмме Аббе определить марку стекла, имеющего  $n_e=1,5784$  и  $\nu_e = 41.31$ .

7. К фосфатным кронам относятся стекла с коэффициентом преломления и коэффициентом дисперсии (указать диапазон по диаграмме Аббе).

8. 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  $100\text{ }^\circ\text{C}$ . Необходимые данные приведены в таблице.

Показатель преломления и механические характеристики для стекла марки ЛК3

Длина волны, нм	Символ	Хим. элемент	ЛК 3	Плотность, $\rho$ ,	2,46
365,0146	i	Hg	1,50414	г/см <sup>3</sup>	
404,6561	h	Hg	1,49900	Модуль сдвига, G, Па	$2569 \cdot 10^7$
435,8343	g	Hg	1,49596	Коэффициент Пуассона (коэффициент поперечной деформации), $m$	0,228
479,9914	F'	Cd	1,49264		
486,1327	F	H	1,49226		
546,0740	e	Hg	1,48911		
587,5618	d	He	1,48746	Температурный коэффициент показателя преломления, K <sup>-1</sup>	$-15 \cdot 10^{-7}$
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		

9. Пользуясь приведенной таблицей, рассчитать модуль сдвига и удельную жесткость, среднюю дисперсию и коэффициент дисперсии (число Аббе  $\nu_e$ ) для стекла марки К8. Рассчитать показатель преломления для  $d$  линии при температуре  $110\text{ }^\circ\text{C}$ . Необходимые данные приведены в таблице.

Показатель преломления и механические характеристики для стекла марки К 8



Длина волны, нм	Симво л	Хим. элемент	К 8
365,0146	i	Hg	1,53582
404,6561	h	Hg	1,52982
435,8343	g	Hg	1,52626
479,9914	F'	Cd	1,52238
486,1327	F	H	1,52195
546,0740	e	Hg	1,51829
587,5618	d	He	1,51637
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

Плотность, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	2,52
Модуль упругости, $E$ , Па	$8065 \cdot 10^7$
Коэффициент Пуассона (коэффициент поперечной деформации), $\mu$	0,209
Температурный коэффициент показателя преломления, $K^{-1}$	$24 \cdot 10^{-7}$

10. Для стекла марки БК 4 рассчитать среднюю дисперсию и коэффициент дисперсии (число Аббе  $\nu_e$ ), коэффициент Пуассона и удельную жесткость. Рассчитать показатель преломления для  $F$  линии при температуре  $90^\circ\text{C}$ . Необходимые данные приведены в таблице.

Показатель преломления и механические характеристики для стекла марки БК 4

Длина волны, нм	Симво л	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		

11. Для стекла марки СТК 3 рассчитать среднюю дисперсию и коэффициент дисперсии (число Аббе  $\nu_e$ ), 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
365,0146	i	Hg	1,68789
404,6561	h	Hg	1,67896
435,8343	g	Hg	1,67376
479,9914	F'	Cd	1,66816
486,1327	F	H	1,66750
546,0740	e	Hg	1,66223
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

Плотность, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	3,91
Модуль сдвига, $G$ , Па	$3449 \cdot 10^7$
Коэффициент Пуассона (коэффициент поперечной деформации), $\mu$	0,283
Температурный коэффициент показателя преломления, $K^{-1}$	$-4 \cdot 10^{-7}$

12. Пользуясь приведенной таблицей, рассчитать модуль сдвига и удельную жесткость, среднюю дисперсию и коэффициент дисперсии (число Аббе  $\nu_e$ ) 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

Плотность, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	3,20
Модуль упругости, $E$ , Па	$7203 \cdot 10^7$
Коэффициент	0,247

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

Пуассона (коэффициент поперечной деформации), <i>m</i>	
Температурный коэффициент показателя преломления, K <sup>-1</sup>	30*10 <sup>-7</sup>

13. 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	Симво л	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*10 <sup>7</sup>
Модуль сдвига, $G$ , Па	2903*10 <sup>7</sup>
Температурный коэффициент показателя преломления,	34*10 <sup>-7</sup>

1013,980	t	Hg	1,50831	K <sup>-1</sup>	
----------	---	----	---------	-----------------	--

14. 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	Температурный коэффициент показателя преломления, K <sup>-1</sup>	32*10 <sup>-7</sup>
643,8469	C'	Cd	1,52236		
656,2725	C	H	1,52189		
706,5188	r	He	1,52087		
852,1100	s	Cs	1,51664		
1013,980	t	Hg	1,51441		

15. 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, г/см <sup>3</sup>	4,02
365,0146	i	Hg	1,70771	Модуль упругости, <i>E</i> , Па	7889*10 <sup>7</sup>
404,6561	h	Hg	1,69576	Коэффициент Пуассона (коэффициент поперечной деформации), <i>m</i>	0,286
435,8343	g	Hg	1,68897		
479,9914	F'	Cd	1,68180	Температурный коэффициент показателя преломления, K <sup>-1</sup>	22*10 <sup>-7</sup>
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		
852,1100	s	Cs	1,65927		
1013,980	t	Hg	1,65626		

16. Для стекла марки ТФ 1 рассчитать среднюю дисперсию и коэффициент дисперсии (число Аббе  $\nu_e$ ), 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*10 <sup>7</sup>
404,6561	h	Hg	1,68229		
435,8343	g	Hg	1,67245		
479,9914	F'	Cd	1,66234	Модуль сдвига, $G$ , Па	2184*10 <sup>7</sup>
486,1327	F	H	1,66118		
546,0740	e	Hg	1,65218		
587,5618	d	He	1,64766		
589,2938	D	Na*)	1,64750		
643,8469	C'	Cd	1,64295	Температурный коэффициент показателя преломления, К <sup>-1</sup>	42*10 <sup>-7</sup>
656,2725	C	H	1,64207		
706,5188	r	He	1,63900		
852,1100	s	Cs	1,63254		
1013,980	t	Hg	1,62892		

**Задание к практическим занятиям по разделам: «Оптические монокристаллические материалы и их технологии» и «Оптические поликристаллические материалы и их технологии»**

**Примеры решения задач:**

**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  $a = 0,28$  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

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

**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:*  $\Delta l = 0,025 \text{ нм}$ .

#### **Задачи для самостоятельного решения:**

Задача 1 У ионного кристалла с одним типом примеси при температуре минус  $20^\circ\text{C}$  статическая (в постоянном поле) относительная восприимчивость ионно-релаксационной поляризации равна  $6,6$ , чему равна относительная восприимчивость при  $100^\circ\text{C}$ ? Дайте ответ на основе теоретической формулы для слабых полей (Ответ:  $4,477$ )

Задача 2 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 (Ответ:  $1,131 \cdot 10^{-7} \text{ с}$ )

Задача 3. Известно, что ниобат калия кристаллизуется в структуре перовскита с периодом решетки  $s \approx a = 0,4 \text{ нм}$ . Определить электрический дипольный момент на одну элементарную ячейку, если спонтанная поляризованность этого сегнетоэлектрика  $P = 0,3 \text{ мКл}\cdot\text{м}^{-2}$



Задача 4 Из двух пьезокристаллических материалов А и В, 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 А равна 0,7 г, стержня В - 1,9 г. Модуль продольной упругости стержня А равен  $2.9 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>, а стержня В - на  $5,6 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>. Во сколько раз частота первой гармоники пьезорезонанса стержня А отличается от частоты первой гармоники стержня В? В ответе укажите отношение частоты первой гармоники стержня А к частоте первой гармоники стержня В. (Ответ: 1,185)

Задача 5 Из двух пьезокристаллических материалов А и В, 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 А равна 2500 кг/м<sup>3</sup>, стержня В - 4000 кг/м<sup>3</sup>. Модуль продольной упругости стержня А равен  $2.9 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>, а стержня В - на  $5,6 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>. Если длина стержня А равна 5 см, то чему равна длина стержня В? (Ответ: 5,5 см)

Задача 6 Из кристалла пьезоэлектрического кварца вырезана перпендикулярно электрической оси Х пластинка толщиной 1 мм. Вдоль этой оси пьезомодуль продольного пьезоэффекта  $d_{11} = 2,3 \cdot 10^{-12}$  Кл/Н. Если механическое напряжение, равное 105 Н/м<sup>2</sup>, направлено вдоль оси Х, то чему будет равна разность электрических потенциалов между противоположными плоскостями пластинки? Диэлектрическая проницаемость кварца = 4,5. (Ответ: 5,7 В).

### **Задание к практическим занятиям по разделам:**

**«Полупроводниковые материалы», «Полимерные материалы», «Фотонно-кристаллические материалы»**

По одной выбранной теме из этих разделов, студент должен сделать доклад с презентацией. Тема согласуется с преподавателем.

### **Литература**

1. Кирилловский, Владимир Константинович. Современные оптические исследования и измерения [Текст] : учебное пособие / В. К. Кирилловский. - СПб. : Лань, 2010. - 303 с. : ил., граф. - (Учебники для вузов. Специальная литература).
2. Астахов, А. В. Оптическое материаловедение [Электронный ресурс] : учебное пособие / А. В. Астахов, Е. В. Полякова, В. Е. Стригалева ; рец.: Н. Л. Урванцева, И. В. Гришин ; Федеральное агентство связи, Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф.

М. А. Бонч-Бруевича". - СПб. : СПбГУТ, 2014. - 96 с. : ил. - Б. ц.

3. Глущенко, А. Г. Оптическое материаловедение. Материалы и оптические элементы в фотонике [Электронный ресурс] : учебное пособие / Глущенко А. Г. - Самара : Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2017. - 241 с. - Б. ц. Книга находится в Премиум-версии ЭБС IPRbooks.

4. Немилов, С. В. Оптическое материаловедение. Оптические стекла [Электронный ресурс] : учебное пособие / Немилов С. В. - Санкт-Петербург : Университет ИТМО, 2011. - 181 с. - Б. ц. Книга находится в Премиум-версии ЭБС IPRbooks