

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

«Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники»

Кафедра конструирования узлов и деталей РЭА

## **ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ**

Методические указания по лабораторным работам  
по дисциплине «Оптические свойства твердых тел» по направлению  
подготовки 11.03.03 «Конструирование и технология электронных  
средств (Конструирование и технология нанoeлектронных средств)»

Кистенева М.Г.

Оптические свойства твердых тел = Оптические свойства твердых тел: Методические указания по лабораторным занятиям по дисциплине «Оптические свойства твердых тел» для студентов направления подготовки 11.03.03 - Конструирование и технология электронных средств (Конструирование и технология наноэлектронных средств) /М.Г. Кистенева; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра конструирования узлов и деталей РЭА. – Томск: ТУСУР, 2017. – 51 с.

В методических указаниях приведен краткий обзор необходимых теоретических сведений, примеры типовых расчетов оптических констант материалов и задания для самостоятельного расчета по дисциплине «Оптические свойства твердых тел».

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

В ходе выполнения заданий у студентов формируются следующие компетенции:

- способностью выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлекать для их решения соответствующий физико-математический аппарат (**ОПК-2**);

Предназначено студентов направления подготовки 11.03.03 - Конструирование и технология электронных средств (Конструирование и технология наноэлектронных средств).

## Содержание

1 Введение.....	6
Лабораторная работа №1. Взаимодействие оптического излучения с веществом. Скорость света. Оптические константы среды.....	7
1.1 Введение .....	7
1.2 Теоретическая часть .....	7
1.2.1 Коэффициенты отражения и пропускания света .....	7
1.2.2 Примеры расчета коэффициентов отражения и пропускания оптических материалов .....	9
1.3 Расчетная часть .....	11
1.3.1 Задания.....	11
1.3.2 Порядок выполнения работы .....	12
Лабораторная работа №2. Поглощение света .....	13
2.1 Введение.....	13
2.2 Теоретическая связь .....	13
2.2.1 Закон Бугера.....	13
2.2.2 Примеры расчета коэффициента поглощения и интенсивности света с применением закона Бугера .....	14
2.3 Расчетная часть .....	15
2.3.1 Задания.....	15
2.3.2 Порядок выполнения работы .....	17
Лабораторная работа №3. Поглощение света с учетом многократного отражения.....	18
3.1 Введение.....	18
3.2 Теоретическая связь .....	18
3.2.1 Поглощение света с учетом многократного отражения .....	18
3.3 Расчетная часть .....	19
3.3.1 Задания.....	19
3.3.2 Порядок выполнения работы .....	21
Лабораторная работа №4. Отражение и преломление света на границе двух сред .....	22
4.1 Введение.....	22
4.2 Теоретическая часть.....	22

4.2.1 Эффект полного внутреннего отражения как частный случай закона преломления.....	22
4.2.2 Примеры расчета оптических констант материала при полном внутреннем отражении света интенсивности света .....	25
4.4 Расчетная часть .....	26
4.4.1 Задания.....	26
4.3.2 Порядок выполнения работы .....	28
Лабораторная работа №5. Поляризация света. Формулы Френеля.....	28
5.1 Введение.....	28
5.2 Теоретическая часть.....	28
5.2.1 Поляризация света. Формулы Френеля. Закон Брюстера.....	28
5.2.2 Примеры расчета оптических констант материала с использованием формул Френеля .....	30
5.3 Расчетная часть .....	32
5.3.1 Задания.....	32
5.3.2 Порядок выполнения работы .....	33
Лабораторная работа №6. Бесцветное оптическое стекло. Диаграмма Аббе.....	34
6.1 Введение.....	34
6.2 Теоретическая часть.....	34
6.2.1 Оптические постоянные бесцветного неорганического стекла .....	34
6.3 Порядок выполнения работы.....	38
Лабораторная работа №7. Бесцветное оптическое стекло. Механические свойства бесцветного неорганического стекла.....	38
7.1 Введение.....	38
7.2 Теоретическая часть.....	38
7.2.1 Механические свойства бесцветного неорганического стекла.....	38
7.3 Расчетная часть .....	41
7.3.1 Задания.....	41
7.3.2 Порядок выполнения работы .....	46
Лабораторная работа №8. Цветное оптическое стекло.....	46
8.1 Введение.....	46
8.2 Теоретическая часть.....	46
8.2.1 Цветное оптическое стекло .....	46
8.2.2 Спектральная характеристика цветного стекла.....	47

8.2.3 Светофильтры.....	47
8.3 Порядок выполнения работы.....	49
Рекомендуемая литература .....	51

## 1 Введение

Оптические свойства твёрдых тел очень разнообразны. Металлы в основном имеют высокий коэффициент отражения света в видимой области спектра, много диэлектриков прозрачны, 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 типовых расчетов оптических констант материалов и задания для самостоятельного расчета по дисциплине «Оптические свойства твердых тел».

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

В ходе выполнения заданий у студентов формируются следующие компетенции:

- способностью выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлекать для их решения соответствующий физико-математический аппарат (ОПК-2).

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, рассчитывать основные оптические характеристики твердых тел.

- *владеть*: навыками выбора методов исследования, обобщения и интерпретации результатов исследования оптических свойств твердых тел.

## Лабораторная работа №1. Взаимодействие оптического излучения с веществом. Скорость света. Оптические константы среды

### 1.1 Введение

Оптические свойства материалов являются результатом их взаимодействия с электромагнитным излучением.

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

### 1.2 Теоретическая часть

#### 1.2.1 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  $I_T$ .

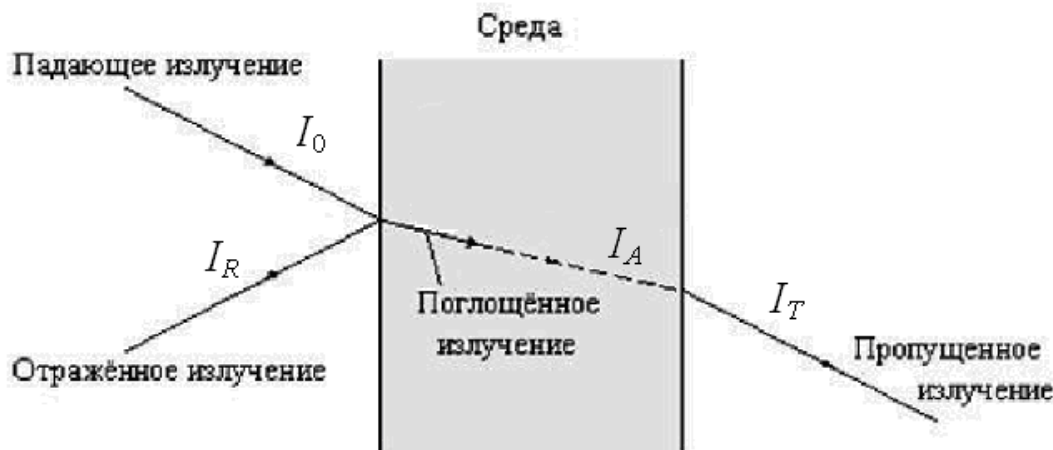


Рис. 2.1. Схема, иллюстрирующая оптические процессы, происходящие на поверхности среды и внутри неё

$I_0$  - 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

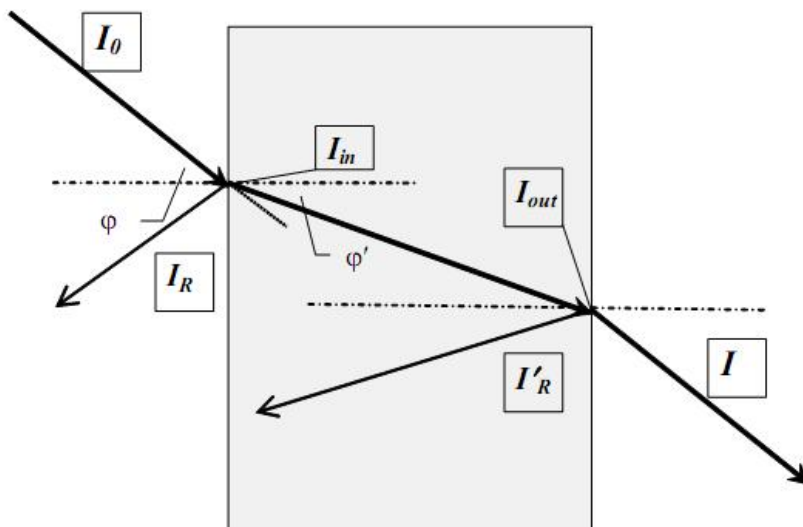


Рис. 2.2. Потоки излучения при прохождении монохроматического луча через пластину из этого материала.

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> /с	$L T^{-1}$
$\epsilon_0$	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	$L M T^{-2} I^{-2}$

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

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

### 1.2.2 Примеры расчета коэффициентов отражения и пропускания оптических материалов

*Пример 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),

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

$$I_2 = I_{1B} - I_{2R} = (1-R)^2 \cdot TI_0, \text{ ( в точке}$$

C),

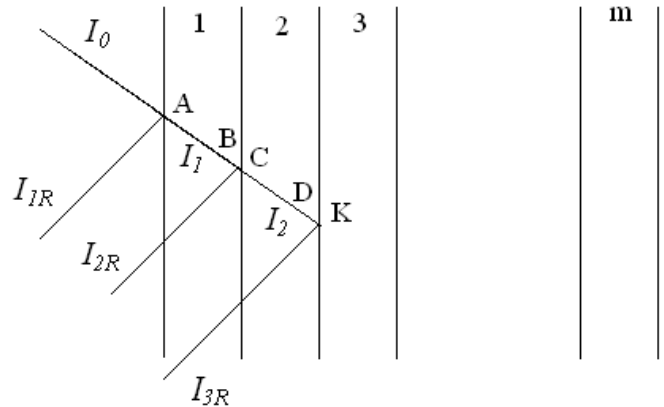
$$I_{3R} = R \cdot (1-R)^2 \cdot T^2 \cdot I_0 \text{ и т.д.}$$

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

$$T^m \cdot I_0,$$

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

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



*Пример 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

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

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

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

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

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

*Пример 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%

### 1.3 Расчетная часть

#### 1.3.1 Задания

1.3.1 Рассчитать коэффициент отражения света при нормальном падении на поверхность воды ( $n = 1,33$ ).

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

1.3.2 Для некоторой длины волны света диэлектрическая проницаемость среды равна 2,323. Чему равен показатель преломления среды для этой длины волны?

1.3.3 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  $\mu = 1$ .

1.3.4 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).

1.3.5 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.

1.3.6 Рассчитать коэффициент пропускания при нормальном падении света из воздуха на стекло, показатель преломления которого равен  $n = 1,5$ .

1.3.7 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.

1.3.8 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).

- 1.3.9 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  $\mu = 1$ .
- 1.3.10 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).
- 1.3.11 Рассчитать коэффициенты отражения и пропускания при нормальном падении света из воды ( $n_1 = 1,33$ ) на стекло ( $n_2 = 1,5$ ).
- 1.3.12 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.
- 1.3.13 Для некоторой длины волны света диэлектрическая проницаемость среды равна  $2,323$ . Чему равен коэффициент отражения среды для этой длины волны при нормальном падении света?
- 1.3.14 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  $b = 0,004563$  мкм<sup>2</sup> – константы. Рассчитать показатели преломления для длин волн красной части видимого спектра  $\lambda_k = 780$  нм и фиолетовой части  $\lambda_\phi = 380$  нм.
- 1.3.15 Рассчитать относительную диэлектрическую постоянную среды, в которой скорость света равна  $1,945 \times 10^8$  м/с. Значение относительной магнитной проницаемости среды принять равной  $\mu = 1$ .
- 1.3.16 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  $\mu = 1$ .

### 1.3.2 Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с теоретической частью и примерами расчета.
2. По заданию преподавателя выполнить расчеты из п. 1.3.1.
3. Полученные результаты расчетов подтвердить у преподавателя.

## Лабораторная работа №2. Поглощение света

### 2.1 Введение

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

### 2.2 Теоретическая связь

#### 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.2.1). 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

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

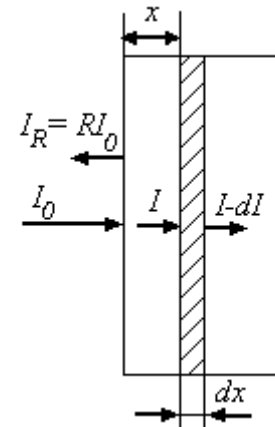


Рис. 2.1. Поглощение света в кристалле

(2.1)

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

$$\frac{dI}{I} = -kdx, \quad \ln I = -kx + \ln C, \text{ и далее} \quad I = Ce^{-kx}. \quad (2.2)$$

Используя начальное условие  $I(0) = I_0$ , найдем константу интегрирования  $C$ , которая равна  $C = I_0$ . Тогда уравнение (2.2) принимает вид

$$I = I_0 e^{-kx}. \quad (2.3)$$

В уравнении (2.3) коэффициент  $k$  имеет размерность, обратную длине, и носит название линейного коэффициента поглощения. Как видно из уравнения (2.3) коэффициент поглощения – это величина, равная обратной величине толщины пластинки, при которой интенсивность света ослабляется в  $e$  раз (рис.2.2).

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  $\exp(\alpha d)$  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

$$T = \frac{I}{I_0} = (1-R)^2 \exp(-kd). \quad (3.4)$$

## 2.2.2 Примеры расчета коэффициента поглощения и интенсивности света с применением закона Бугера

*Пример 2.1.* 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:*

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

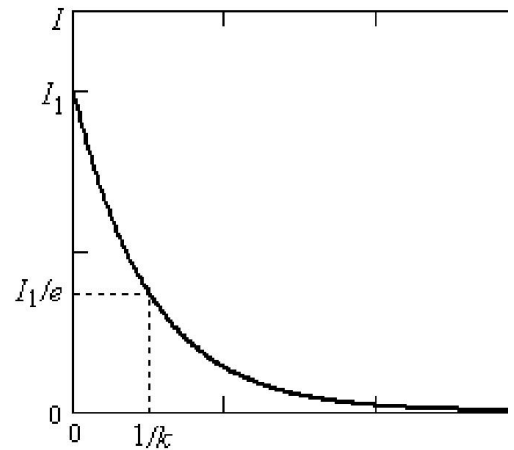


Рис. 2.2. Зависимость интенсивности прошедшего через образец света от толщины кристалла

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

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

$$I/I_0 = 0,905$$

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

(Ответ: 0,095 или 9,5 %).

**Пример 2.2.** Интенсивность монохроматической волны, прошедшей через прозрачную пластинку толщиной 10 см, уменьшилась на 20%. Определить коэффициент поглощения.

*Решение:*

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

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

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

## 2.3 Расчетная часть

### 2.3.1 Задания

- 2.3.1 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  $n = 1,52$ .
- 2.3.2 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?
- 2.3.3 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  $3L$ ?
- 2.3.4 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?
- 2.3.5 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.
- 2.3.6 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.

- 2.3.7 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.
- 2.3.8 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.
- 2.3.9 На сколько процентов уменьшается интенсивность света при прохождении им оконного стекла толщиной 4 мм за счет поглощения? Коэффициент поглощения равен  $1,23 \text{ м}^{-1}$ .
- 2.3.10 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  $k = 1,2 \text{ м}^{-1}$ ?
- 2.3.11 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  $n = 1,52$ .
- 2.3.12 Стеклянная пластина толщиной  $d = 3,82 \text{ мм}$ , пропускает 88,2 % упавшего на нее света. Определить коэффициент поглощения стекла для данной длины волны.
- 2.3.13 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.
- 2.3.14 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  $d = 5 \text{ см}$ . Определить интенсивность света, прошедшего через пластинку, если отражение отсутствует.
- 2.3.15 Монохроматический свет нормально падает на две сложенные вместе стеклянные пластинки толщиной соответственно  $x_1 = 1 \text{ см}$  и  $x_2 = 1,5 \text{ см}$ , 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.



- 2.3.16 Интенсивность монохроматической волны прошедшей через прозрачную пластинку толщиной 10 см уменьшилась на 20 %. Определить коэффициент поглощения.
- 2.3.17 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?
- 2.3.18 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.
- 2.3.19 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.

### 2.3.2 Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с теоретической частью и примерами расчета.
2. По заданию преподавателя выполнить расчеты из п. 2.3.1.
3. Полученные результаты расчетов подтвердить у преподавателя.

## Лабораторная работа №3. Поглощение света с учетом многократного отражения

### 3.1 Введение

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

### 3.2 Теоретическая связь

#### 3.2.1 Поглощение света с учетом многократного отражения

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

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

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

$$P'_E, P''_E, P'_F, P''_F, \text{ получим}$$

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

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

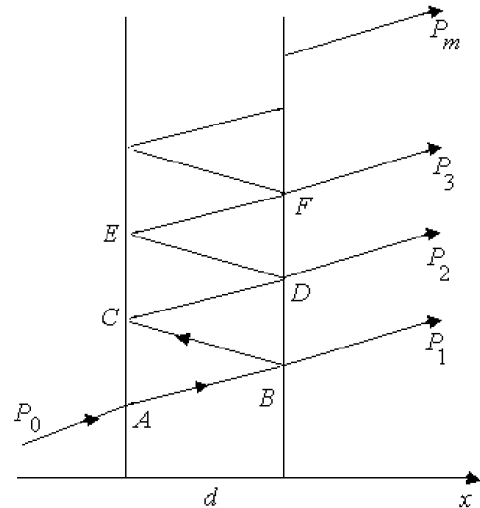


Рис. 3.1. Схема к выводу формулы (3.1)

$S=(a_1-a_m \cdot q)/(1-q)$ , 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

$$T = \frac{(1-R)^2 \exp(-kd)}{1-R^2 \exp(-2kd)}. \quad (3.1)$$

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 (3.1).

### 3.3 Расчетная часть

#### 3.3.1 Задания

3.3.1 Используя выражение (3.1) найти явное выражение для коэффициента поглощения.

3.3.2 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

$$n^2(\lambda) = A + \frac{B\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_0^2} + \frac{C\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_f^2},$$

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.

3.3.3 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  $R = C_0 + \frac{C_5}{\lambda^5} + \frac{C_4}{\lambda^4} + \frac{C_3}{\lambda^3} + \frac{C_2}{\lambda^2} + \frac{C_1}{\lambda}$  (в этой формуле длина волны подставляется в нм), где для  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$  ее параметры имеют значения:  $C_0 = 0,199094255$ ,  $C_1 = -38,345115881$ ,  $C_2 = 21241,53311$ ,  $C_3 = 88,70185714$ ,  $C_4 = 1,265004055$ ,  $C_5 = 0,99992933$ .

3.3.4 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  $n^2(\lambda) = A + \frac{B\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_0^2} + \frac{C\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_f^2}$ , 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.

3.3.5 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.

3.3.6 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.

- 3.3.7 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.

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

### 3.3.2 Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с теоретической частью и примерами расчета.
2. По заданию преподавателя выполнить расчеты из п. 3.3.1.
3. Полученные результаты расчетов подтвердить у преподавателя.

## **Лабораторная работа №4. Отражение и преломление света на границе двух сред**

### **4.1 Введение**

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

### **4.2 Теоретическая часть**

#### **4.2.1 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. 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.

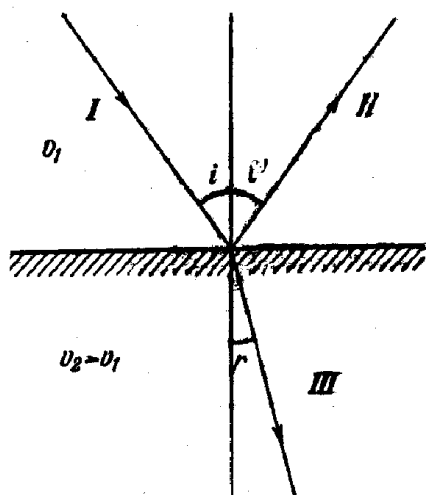


Рисунок 4.1

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 положить

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.

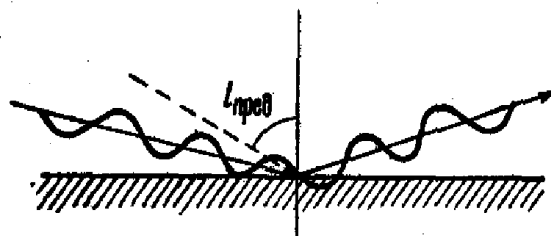


Рисунок 4.2

*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, поступаая 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.

#### 4.2.2 Примеры расчета оптических констант материала при полном внутреннем отражении света интенсивности света

*Пример 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  $41^\circ 16'$ .

*Пример 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  $n_2=1,42$ .

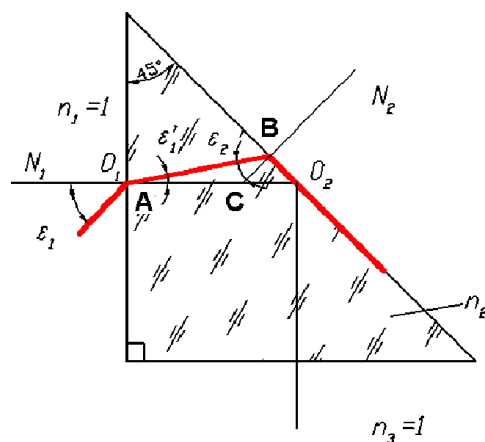
*Пример 3.* Определить в градусах и минутах предельный угол падения лучей  $\varepsilon_1$  на входную грань прямоугольной равнобедренной призмы, при котором отражающая грань может быть еще без зеркального покрытия. Призма изготовлена из стекла  $n_2=1,52$  и находится в воздухе.

*Решение.*

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

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

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



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

**Пример 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  $n$ .

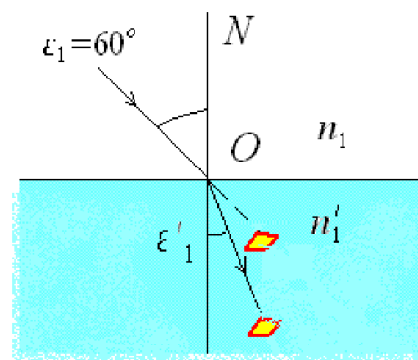
По закону преломления:  $n \sin \varepsilon = n' \sin \varepsilon'$

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

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

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

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



## 4.4 Расчетная часть

### 4.4.1 Задания

4.1.1 На кварцевую пластинку, имеющую показатель преломления 1.54, падает световой луч. Чему равен угол падения, если отраженный и преломленный лучи взаимно перпендикулярны?

4.1.2 Луч падает под углом  $60^\circ$  на стеклянную пластинку толщиной 3 см. Определить боковое смещение луча после выхода из пластинки.

4.1.3 Предельный угол полного внутреннего отражения для бензола  $\alpha = 42^\circ$ . Определить скорость света в бензоле.

4.1.4 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?

4.1.5 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.

4.1.6 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.

4.1.7 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?

4.1.8 Показатель преломления первой среды  $n_1 = 2$ . Угол полного внутреннего отражения равен  $45^\circ$ . Определить диэлектрическую проницаемость второй среды.

4.1.9 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.

4.1.10 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?

4.1.11 Показатель преломления первой среды  $n_1 = 2$ , второй  $n_2 = 1$ . При каком наименьшем угле падения (в градусах) возможно явление полного внутреннего отражения?

4.1.12 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?

4.1.13 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.

4.1.14 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.

4.1.15 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?

### 4.3.2 Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с теоретической частью и примерами расчета.
2. По заданию преподавателя выполнить расчеты из п. 4.3.1.
3. Полученные результаты расчетов подтвердить у преподавателя.

## Лабораторная работа №5. Поляризация света. Формулы Френеля.

### 5.1 Введение

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

### 5.2 Теоретическая часть

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

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

$$E_{01} = \frac{|n_1 - n_2|}{n_1 + n_2} E_{00}, \quad (5.1)$$

$$E_{02} = \frac{2n_1}{n_1 + n_2} E_{00}. \quad (5.2)$$

Коэффициент отражения

$$R = \frac{E_{01}^2}{E_{00}^2}. \quad (5.3)$$

Коэффициент пропускания

$$T = \frac{E_{02}^2 n_2 \cos \varphi_2}{E_{00}^2 n_1 \cos \varphi_1}. \quad (5.4)$$

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

При нормальном падении

$$R = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2; \quad T = \frac{4n_1 n_2}{(n_1 + n_2)^2}. \quad (5.5)$$

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  $\varphi = \varphi_{Бр}$ , 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  $\varphi_{Бр}$  называется еще углом полной

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

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

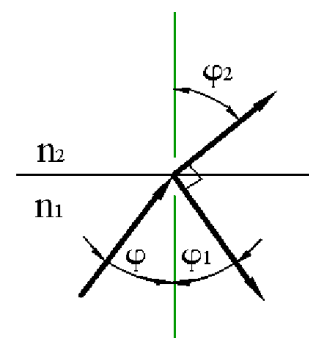
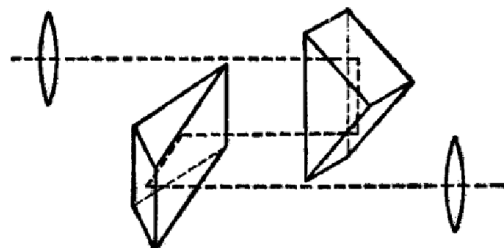


Рис. 5.1. К определению угла Брюстера

беспрепятственно, не испытывая отражения. В результате лазер генерирует свет, поляризованный в этой плоскости.

### 5.2.2 Примеры расчета оптических констант материала с использованием формул Френеля

*Пример 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 %.

*Пример 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

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

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

*Пример 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:  $\text{tg}\theta_1 = n_2/n_1$ , 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:

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

Учитывая, что  $\text{tg}\theta_1 = \sin\theta_1/\cos\theta_1$ , 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:  $\theta_2 = 36^\circ$ .

## 5.3 Расчетная часть

### 5.3.1 Задания

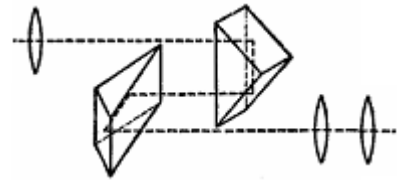
5.3.1 Угол преломления луча в жидкости  $i_2 = 35^\circ$ . Определить показатель преломления  $n$  жидкости, если известно, что отраженный пучок света максимально поляризован.

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

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



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



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

5.3.6 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.

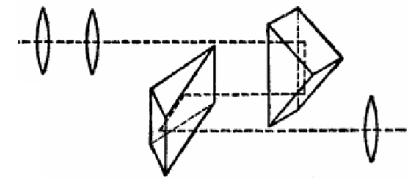
5.3.7 Определить угол преломления  $\varphi_2$  пучка, падающего на поверхность стекла под углом Брюстера  $\varphi_1=57^\circ$ .

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

5.3.9 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.

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

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



5.3.12 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  $\theta=48^\circ$ .

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

5.3.14 Определить угол падения  $\varphi$  света поверхность воды, если отраженный пучок максимально поляризован. Показателем преломления воды  $n = 1,33$ .

5.3.15 Определить скорость света в алмазе, если угол полной поляризации света при отражении от поверхности алмаза равен  $67^\circ 30'$ .

5.3.16 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  $\varphi = 44^\circ$ .

### 5.3.2 Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с теоретической частью и примерами расчета.
2. По заданию преподавателя выполнить расчеты из п. 5.3.1.
3. Полученные результаты расчетов подтвердить у преподавателя.

**Лабораторная работа №6. Бесцветное оптическое стекло.  
Диаграмма Аббе.**

**6.1 Введение**

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.

**Цель лабораторной работы** – научиться строить диаграмму Аббе для бесцветных оптических стекол.

**6.2 Теоретическая часть**

**6.2.1 Оптические постоянные бесцветного неорганического стекла**

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

**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. 6.1.

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

Таблица 6.1.

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 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, перейдя 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* –  $\nu_{\lambda_1}$ , задается выражением:

$$\nu_{\lambda_1} = (n_{\lambda_1} - 1) / (n_{\lambda_3} - n_{\lambda_2}), \quad (6.1)$$

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

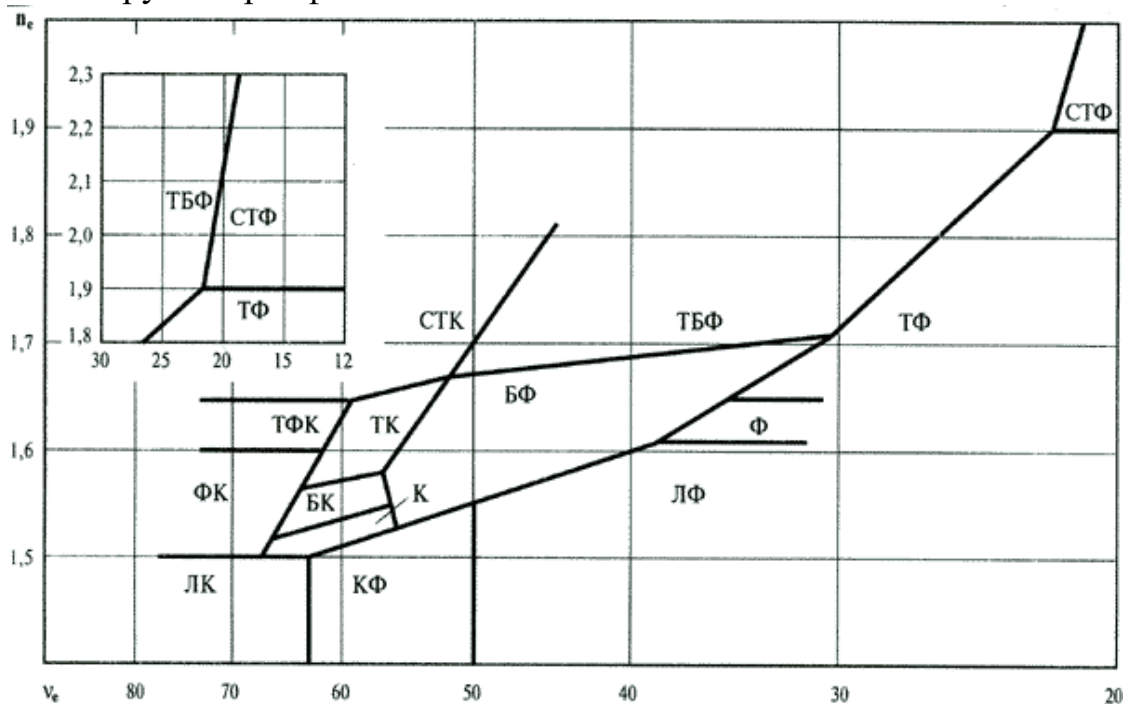


Рис. 6.1. Диаграмма Аббе

### 6.3 Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с теоретической частью и примерами расчета.
2. По данным 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> построить диаграмму Аббе
3. Полученные результаты расчетов подтвердить у преподавателя.

## Лабораторная работа №7. Бесцветное оптическое стекло. Механические свойства бесцветного неорганического стекла.

### 7.1 Введение

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

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

### 7.2 Теоретическая часть

#### 7.2.1 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.

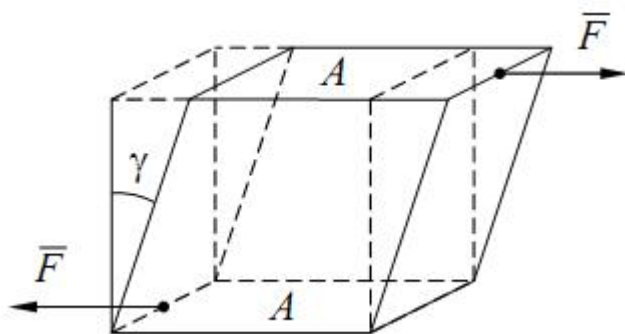


Рис. 7.1. Модуль сдвига

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.

### 7.3 Расчетная часть

#### 7.3.1 Задания

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

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

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

7.3.4 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?

7.3.5 По диаграмме Аббе определить марку стекла, имеющего  $n_e=1,695$  и  $\nu_e = 54.79$ .

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

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

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

7.3.9 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 ЛК 3

Длина волны, нм	Символ	Хим. элемент	ЛК 3
365,0146	i	Hg	1,50414
404,6561	h	Hg	1,49900
435,8343	g	Hg	1,49596
479,9914	F'	Cd	1,49264
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

Плотность, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	2,46
Модуль сдвига, $G$ , Па	$2569 \cdot 10^7$
Коэффициент Пуассона (коэффициент поперечной деформации), $m$	0,228
Температурный коэффициент	$-15 \cdot 10^{-7}$

706,5188	r	He	1,48407
852,1100	s	Cs	1,48118
1013,980	t	Hg	1,47928

показателя преломления, $K^{-1}$	
--	--

7.3.10 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 К 8

Длина волны, нм	Символ	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
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

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

7.3.11 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
365,0146	i	Hg	1,55180
404,6561	h	Hg	1,54508
435,8343	g	Hg	1,54112
479,9914	F'	Cd	1,53687
486,1327	F	H	1,53637
546,0740	e	Hg	1,53236
587,5618	d	He	1,53027
589,2938	D	Na*)	1,53020

Плотность, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	2,76
Модуль упругости, $E$ , Па	$7027 \cdot 10^7$
Модуль сдвига, $G$ , Па	$2865 \cdot 10^7$

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

Температурный коэффициент показателя преломления, К <sup>-1</sup>	20·10 <sup>-7</sup>
---	---------------------

7.3.12 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
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	3449·10 <sup>7</sup>
Коэффициент Пуассона (коэффициент поперечной деформации), $\mu$	0,283
Температурный коэффициент показателя преломления, К <sup>-1</sup>	-4·10 <sup>-7</sup>

7.3.13 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

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

546,0740	e	Hg	1,57486	(коэффициент поперечной деформации), $m$	
587,5618	d	He	1,57248		
589,2938	D	Na*)	1,57240	Температурный коэффициент показателя преломления, $K^{-1}$	$30 \cdot 10^{-7}$
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		

7.3.14 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	Плотность, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	2,57
365,0146	i	Hg	1,53982	Модуль упругости, $E$ , Па	$7036 \cdot 10^7$
404,6561	h	Hg	1,53302		
435,8343	g	Hg	1,52904	Модуль сдвига, $G$ , Па	$2903 \cdot 10^7$
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	Температурный коэффициент показателя преломления, $K^{-1}$	$34 \cdot 10^{-7}$
852,1100	s	Cs	1,51049		
1013,980	t	Hg	1,50831		

7.3.15 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	$2839 \cdot 10^7$
404,6561	h	Hg	1,54111		
435,8343	g	Hg	1,53670		

479,9914	F'	Cd	1,53198	Коэффициент Пуассона (коэффициент поперечной деформации), $m$	0,203
486,1327	F	H	1,53144		
546,0740	e	Hg	1,52706	Температурный коэффициент показателя преломления, $K^{-1}$	$32 \cdot 10^{-7}$
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		
852,1100	s	Cs	1,51664		
1013,980	t	Hg	1,51441		

7.3.16 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	$7889 \cdot 10^7$		
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			Температурный коэффициент показателя преломления, $K^{-1}$	$22 \cdot 10^{-7}$
656,2725	C	H	1,66679				
706,5188	r	He	1,66440				
852,1100	s	Cs	1,65927				
1013,980	t	Hg	1,65626				

7.3.17 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	Символ	Хим.	ТФ 1	Плотность, $\rho$ ,	3,86
-------	--------	------	------	---------------------	------

волны, нм	л	элемент	
365,0146	i	Hg	1,70022
404,6561	h	Hg	1,68229
435,8343	g	Hg	1,67245
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
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

г/см <sup>3</sup>	
Модуль упругости, $E$ , Па	$5361 \cdot 10^7$
Модуль сдвига, $G$ , Па	$2184 \cdot 10^7$
Температурный коэффициент показателя преломления, $K^{-1}$	$42 \cdot 10^{-7}$

### 7.3.2 Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с теоретической частью и примерами расчета.
2. По заданию преподавателя выполнить расчеты из п. 7.3.1.
3. Полученные результаты расчетов подтвердить у преподавателя.

## Лабораторная работа №8. Цветное оптическое стекло

### 8.1 Введение

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

### 8.2 Теоретическая часть

#### 8.2.1 Цветное оптическое стекло

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.

### 8.2.2 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.

### 8.2.3 Светофильтры

Светофильтр – оптическая деталь, меняющая спектральный состав, поляризацию и интенсивность падающего на него оптического излучения.

Классификация светофильтров из-за обилия классифицируемых

признаков носит достаточно условный характер.



Абсорбционные светофильтры (лат. *absorbeo* — поглощаю). Обладают спектральной избирательностью, обусловленной различным поглощением различных участков спектра электромагнитного излучения. Наиболее массовые фильтры производятся на основе окрашенных оптических стёкол или органических веществ (например, из желатины)

Кроме абсорбционных, существуют интерференционные светофильтры, имеющие совершенно иной принцип поглощения световой энергии определенного диапазона длин волн. Избирательное поглощение света осуществляется не частицами растворенного красителя, а путем гашения почти всех волн (кроме одной заданной), вследствие интерференции в тонком слое, нанесенном на стеклянную подложку. Светофильтр пропускает свет только той длины волны, на которую рассчитана толщина интерференционного покрытия. Эти светофильтры обладают самой высокой монохроматичностью для любой длины видимой части спектра. Кривая пропускания интерференционных светофильтров представляет собой узкую симметричную "пиковую" полосу, занимающую диапазон длин волн порядка 5—10 нм.

**Отражательные светофильтры**

Действие отражательных фильтров основано на спектральной зависимости отражения непрозрачного материала. Преимуществом отражательного фильтра перед абсорбционными является единственность участвующей в оптической системе поверхности и отсутствии хроматических аберраций, вносимых преломляющими прозрачными средами

Поляризационные светофильтры — один из самых интересных и используемых видов светофильтров, задерживает поляризованный свет. Поляризационный светофильтр имеет тонкую прозрачную пленку с закрепленными очень мелкими кристаллами поляризующего вещества, ориентированными в одном направлении. Пленку крепят между двумя



круглыми защитными стеклами. Светофильтр имеет двойную оправу: внешняя необходима для установки светофильтра на объективе, а внутренняя - для поворота его вокруг оптической оси и установки в положение, при котором происходит выделение и избирательное пропускание световых волн с определенной поляризацией и устранением бликов на изображении. Как правило, поляризационный светофильтр поглощает до 40% света, поляризованного параллельно оси поляризации.

Дисперсионные светофильтры (от лат. *dispersio* — рассеяние) основаны на зависимости показателя преломления от длины волны. В сочетании с отражающими и/или интерференционными фильтрами, а также растром часто служат для создания расщепляющих оптических систем — дихроических призм. Находят применение в современных мультимедийных проекторах, где являются основным инструментом разделения светового потока мощной лампы накаливания на три спектральных диапазона. Применяются в качестве эффективных фильтров для получения радужных изображений.

Монохроматические светофильтры пропускают только узкий диапазон волн; селективные светофильтры наоборот, задерживают часть спектра, а остальное — пропускают; нейтральные — поглощают свет равномерно для всех длин волн.

#### Характеристики светофильтров

Спектральная характеристика светофильтров выражается численными значениями показателя поглощения для различных длин волн, спектральными кривыми оптической плотности и коэффициентами пропускания стекла и самого светофильтра.

Для поляризационных светофильтров определяются следующие параметры: коэффициент светопропускания (у фильтров серии ПФ он равен 32—40%), степень поляризации (98%), разрешающая способность (8 угловых секунд).

Многие светофильтры не могут быть получены в одном стекле. Оптимальные, наиболее близкие к теоретическим светофильтры с определенным ходом спектральных кривых, как правило, получают при составлении двух или трех цветных стекол. Например, светофильтр, приводящий спектральную чувствительность селенового фотоэлемента к спектральной чувствительности глаза, состоит из стекол марок ЖЗС18 и ЗС8 толщиной соответственно 2,1 и 1,9 мм и при этом почти точно воспроизводит заданную спектральную кривую.

### 8.3 Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с теоретической частью и примерами расчета.
2. Используя Каталог цветного оптического стекла (<http://www.chipmaker.ru/files/file/8455/>):

- построить: спектр пропускания цветных стекол (по заданию преподавателя), то есть зависимость коэффициента пропускания от длины волны –  $\tau_{\lambda}(\lambda)$ ;
- спектр поглощения –  $\alpha_{\lambda}(\lambda)$ , из полученной зависимости определите длину волны, соответствующую положению максимума полосы поглощения.

Коэффициент поглощения  $\alpha_{\lambda}$  рассчитывается по формуле:  $\alpha_{\lambda} = \frac{1}{t}d$ ,

где  $d$  – оптическая плотность,  $t$  – толщина образца в см.

3. Полученные результаты расчетов подтвердить у преподавателя.

## 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. Оптическое приборостроение: Учебное пособие для вузов / И. Г. Половцев, Г. В. Симонова; ред.: И. В. Самохвалов; Федеральное агентство по образованию, Томский государственный университет, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН. – Томск: Издательство Томского университета, 2004. ISBN 5-94621-148-X. **(10)**
5. 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)**
6. Оптические свойства полупроводников / Ю. И. Уханов; ред.: В. М. Тучкевич. - М.: Наука, 1977. - 366[2] с. **(2)**
7. Курс физики: учебник для вузов в 3 т. / И. В. Савельев. - М. : Наука, 1989 - . - ISBN 5-02-014052-X. Т. 3: Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. - М. : Наука, 1989. - 301[3] с. : ил. - Имен. указ.: с. 294-295. - Предм. указ.: с. 296-301. - ISBN 5-02-014432-0. **(16)**
8. 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).
9. Савельев И.В. Курс физики. В 3-х тт. Т.3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц: учебное пособие. – СПб.: Издательство «Лань», 2011. - 320 с. - ISBN: 978-5-8114-0684-5. URL: [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_cid=25&pl1\\_id=708](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=708)