

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение  
высшего профессионального образования  
«Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

## **ОПТИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

Методические указания к практическим занятиям  
для студентов направления «Фотоника и оптоинформатика»

2012

Кистенева М.Г.

Оптическое материаловедение = Оптическое материаловедение: Методические указания к практическим занятиям для студентов направления «Фотоника и оптоинформатика» / М.Г. Кистенева; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра электронных приборов. - Томск : ТУСУР, 2012. – 30 с.

Целью настоящего пособия является углубление понимания процессов, происходящих при распространение света в неоднородной среде, эффекте полного внутреннего отражения как частном случае закона преломления. Рассматриваются варианты задач. Уделяется внимание поляризации света, кристаллическому состоянию вещества, линейным и нелинейным оптическим материалам (диэлектрикам).

В ходе выполнения работ у студентов формируются:

- готовность формулировать цели и задачи научных исследований (ПК-10);
- способность предлагать пути решения, выбирать методику и средства проведения научных исследований (ПК-11);
- готовность вести исследования основных физико-химических свойств оптических стёкол и кристаллов, применять методики прогнозирования оптических и физико-химических параметров новых материалов (ПК-19).

Предназначено для студентов очной и заочной форм, обучающихся по направлению «Фотоника и оптоинформатика» по курсу «Оптическое материаловедение».

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

УТВЕРЖДАЮ  
Зав.кафедрой ЭП  
\_\_\_\_\_ С.М. Шандаров  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г.

## **ОПТИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

Методические указания к практическим занятиям  
для студентов направления «Фотоника и оптоинформатика»

Разработчик

\_\_\_\_\_ М.Г. Кистенева  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г

## Содержание

1. Посещение Музея оптики: интерактивная образовательная экспозиция СПбГУ ИТМО .....	5
2. Распространение света в неоднородной среде. Эффект полного внутреннего отражения как частный случай закона преломления.....	5
2.1 Основные понятия.....	5
2.2 Примеры решения задач.....	8
2.3 Задачи для самостоятельного решения.....	9
3. Поляризация света. Формулы Френеля. Закон Брюстера.....	10
3.1 Основные понятия.....	10
3.2 Примеры решения задач.....	12
4 Кристаллическое состояние вещества .....	19
4.1 Основные понятия.....	19
4.2 Примеры решения задач.....	21
4.3 Задачи для самостоятельного решения.....	21
5 Линейные и нелинейные оптические материалы (диэлектрики) .....	22
5.1 Основные понятия.....	22
5.2 Примеры решения задач.....	23
5.3 Задачи для самостоятельного решения.....	24
8 Список литературы .....	29

## 1. Посещение Музея оптики: интерактивная образовательная экспозиция СПбГУ ИТМО)

Выставка (<http://www.optimus.edu.ru/ru>) предназначена для приобщения к миру оптики, ее истории, современности и перспективам развития. Знакомит с широким кругом применений оптических и оптико-информационных технологий, оптических материалов, стимулирует дальнейшее изучение оптических материалов. В музее работают:

- 1) зал голографии;
- 2) зал источников и приемников света;
- 3) зал стекла;
- 4) зал микроскопов;
- 5) зал астрооптики;
- 6) зал ультрафиолета;
- 7) лаборатория.

Виртуальное посещение залов будет сопровождаться кратким рассмотрением теоретического материала, связанного с тематикой каждого зала.

## 2. Распространение света в неоднородной среде. Эффект полного внутреннего отражения как частный случай закона преломления

### 2.1 Основные понятия

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

Простейшей неоднородностью является плоская граница раздела двух безграничных однородных сред, в которых свет распространяется со скоростями, равными соответственно  $v_1$  и  $v_2$ . На рис. 2.1. 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.

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

1. Угол падения равен углу отражения:

$$i = i' \quad (2.1)$$

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

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \text{const} \quad (2.2)$$

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

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n_{12}, \quad (2.3)$$

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

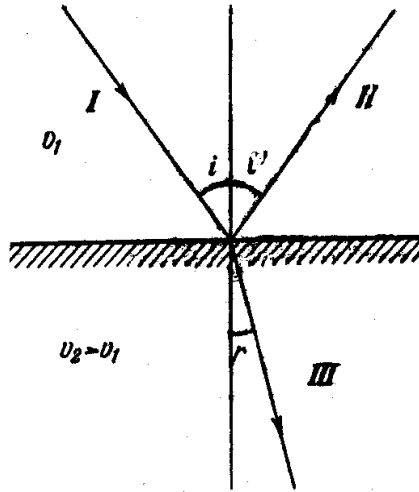


Рисунок 2.1

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

$$n_{12} = n_2 / n_1 \quad (2.4)$$

С учетом соотношения (2.4) закон преломления можно записать в симметричной форме:

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r \quad (2.5)$$

Из этой симметрии следует обратимость световых лучей. Если обратить направление луча III на рис. 2.1. 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 (2.5) 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 (2.5), 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  $i_{\text{пред}}$ , при котором преломленный луч направлен вдоль границы раздела сред, согласно (2.5):

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

Следовательно, при  $i > i_{\text{пред}}$  преломление прекращается и остается лишь отраженный луч (рис. 2.2) Это явление носит название полного внутреннего отражения.

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

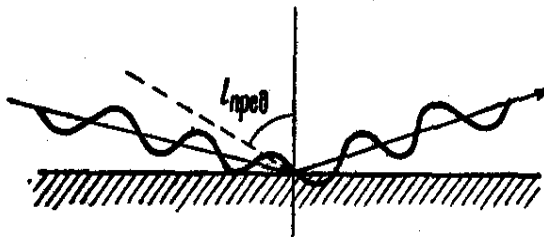


Рисунок 2.2 – Полное внутреннее отражение луча

*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





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

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

*Ответ:*  $\varepsilon_1 = 5^\circ 40'$ .

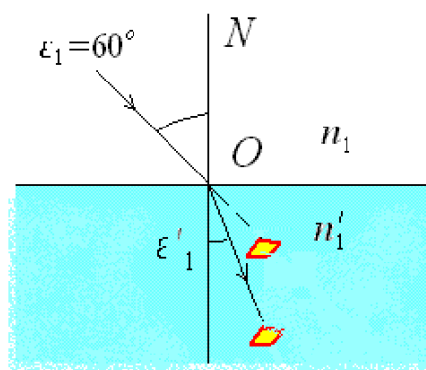
**Задача 4.** Объект, находящийся в воде, виден под углом  $60^\circ$ . Определить угол наклона преломленного луча в воде, если показатель преломления  $n=1,33$ .

*Решение.*

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

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

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



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

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

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

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

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

### 2.3 Задачи для самостоятельного решения

**Задача 2.1.** Показатель преломления первой среды  $n_1=2$ , второй  $n_2=1$ . При каком наименьшем угле падения (в градусах) возможно явление полного внутреннего отражения?

**Задача 2.2.** Показатель преломления первой среды  $n_1=2$ . Угол полного внутреннего отражения равен  $45^\circ$ . Определить показатель преломления второй среды.

**Задача 2.3.** Показатель преломления первой среды  $n_1=1,41$ . Синус угла полного внутреннего отражения  $\sin i_{\text{пред}} = 0,71$ . Определить показатель преломления второй среды.

**Задача 2.4.** Показатель преломления второй среды  $n_2=1$ . Синус угла полного внутреннего отражения  $\sin i_{\text{пред}} = 0,71$ . Определить показатель преломления первой среды.

**Задача 2.5.** Показатель преломления первой среды  $n_1=1,55$ . Угол полного внутреннего отражения равен  $45^\circ$ . Определить показатель преломления второй среды.

**Задача 2.6.** Определить в градусах предельный угол полного внутреннего отражения на границе стекло-воздух. Показатель преломления стекла  $n=1,8$ .

**Задача 2.7.** Определить в градусах предельный угол полного внутреннего отражения на границе стекло-вода. Показатель преломления стекла  $n_1=1,4$ . Показатель преломления воды  $n_2=1,33304$ .

**Задача 2.8.** 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  $n_2=1.4$  и находится в воздухе.

**Задача 2.9.** 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  $n_2=1,5163$  и находится в воздухе.

**Задача 2.10.** Объект, находящийся в воде, виден под углом  $55^\circ$ . Определить реальный угол в воде, под которым находится объект. Показатель преломления воды  $1,33304$ .

**Задача 2.11.** Объект, находящийся в воде, виден под углом  $80^\circ$ . Определить реальный угол в воде, под которым находится объект. Показатель преломления воды  $1,33304$ .

**Задача 2.12.** Объект, находящийся в воде, виден под углом  $35^\circ$ . Определить реальный угол в воде, под которым находится объект. Показатель преломления воды  $1,33304$ .

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

#### 3.1 Основные понятия

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:

$$E_{01} = \frac{|n_1 - n_2|}{n_1 + n_2} E_{00}, \quad (2.6)$$

$$E_{02} = \frac{2n_1}{n_1 + n_2} E_{00}. \quad (2.7)$$

Коэффициент отражения

$$R = \frac{E_{01}^2}{E_{00}^2}. \quad (2.8)$$

Коэффициент пропускания

$$T = \frac{E_{02}^2 n_2 \cos \varphi_2}{E_{00}^2 n_1 \cos \varphi_1}. \quad (2.9)$$

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

При нормальном падении

$$R = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 ; T = \left( \frac{2n_1}{n_1 + n_2} \right)^2 . \quad (2.10)$$

Отражение естественного света, который можно представить как некогерентную смесь двух линейно поляризованных волн с ортогональными направлениями поляризации, обладает замечательным свойством: при падении естественного света под углом  $\varphi = \varphi_{Br}$ , отразится только составляющая, поляризованная перпендикулярно плоскости падения, и отраженный свет будет полностью линейно поляризованным. В этом состоит закон Брюстера, открытый экспериментально в 1815 г. Угол  $\varphi_{Br}$  называется еще углом полной поляризации, а сумма углов падения и преломления равна  $\pi/2$ . Из закона преломления получаем  $tg\varphi_{Br} = n_2/n_1$ . При угле Брюстера отраженная волна всегда линейно поляризована в направлении, перпендикулярном плоскости падения, а волна, поляризованная в плоскости падения, не отражается вообще (рис.3.1).

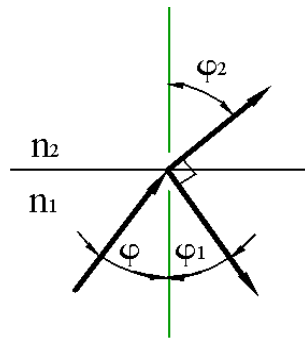


Рисунок 3.1 - К определению угла Брюстера

Из сказанного следует, что эффект Брюстера возможен лишь при поляризации падающего луча в плоскости падения. Если же падающий луч поляризован перпендикулярно плоскости падения, то отраженный луч должен наблюдаться под любым углом падения.

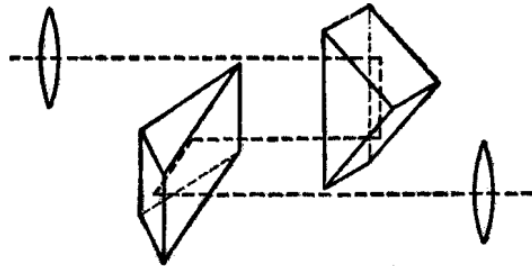
В газовых лазерах торцевые окна разрядной трубки представляют собой плоскопараллельные стеклянные пластинки, расположенные под углом Брюстера к оси трубки. Благодаря этому излучение, распространяющееся вдоль оси трубки в образованном зеркалами открытом резонаторе и поляризованное в плоскости падения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

### 3.2 Примеры решения задач

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

*Решение.*

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



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

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

$R + T = 1$  (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

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

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

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

*Ответ:* потери на отражение составляют 28 %.

#### Задача 2.

1. Найти угол полной поляризации для света, отраженного от стекла с показателем преломления  $n = 1,5$ .

2. 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.*

1.

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

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

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

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

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

Тогда

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

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

Определим степень поляризации

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

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

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

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

*Решение.*

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

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

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

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

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:*  $\theta_2 = 36^\circ$ .

**Задача 4.** Предельный угол полного внутреннего отражения пучка света на границе жидкости с воздухом равен  $\theta=43^\circ$ . Определить угол Брюстера  $\varphi_{Бр}$  для падения луча из воздуха на поверхность этой жидкости.

*Решение.*

Угол полного внутреннего отражения на границе раздела жидкости с показателем преломления  $n$  и воздуха с показателем преломления, равным единице, определяется из условия  $\sin\theta=n$ .

Следовательно, показатель преломления жидкости равен  $n=\sin 43^\circ$ . Угол Брюстера в данном случае может быть определен из условия  $\operatorname{tg} \varphi_{Бр} = n$ . Следовательно, получаем:

$$\varphi_{Бр} = \operatorname{arctg}(n) = \operatorname{arctg}(\sin 43^\circ) = 55^\circ 45'.$$

*Ответ:*  $55^\circ 45'$ .

**Задача 5.** В частично поляризованном свете амплитуда вектора напряженности электрического поля, соответствующая максимальной интенсивности света, в  $n=2$  раза больше амплитуды, соответствующей минимальной интенсивности света. Определить степень поляризации  $P$  света.

*Решение.*

По определению, степень поляризации  $P$  света равна:

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}},$$

где  $I_{\max}$  и  $I_{\min}$ , соответственно, максимальная и минимальная интенсивности света, прошедшего через анализатор. Учитывая, что интенсивность света  $I$  пропорциональна квадрату амплитуды  $E$  вектора напряженности электрического поля, то есть  $I=kE^2$ , где  $k$  - коэффициент пропорциональности, получаем:

$$P = \frac{kE_{\max}^2 - kE_{\min}^2}{kE_{\max}^2 + kE_{\min}^2} = \frac{E_{\max}^2 - E_{\min}^2}{E_{\max}^2 + E_{\min}^2}.$$

Согласно условию задачи  $A_{\max}=nE_{\min}=2E_{\min}$ , поэтому:

$$P = \frac{n^2 - 1}{n^2 + 1} = \frac{3}{5}.$$

*Ответ:*  $P = 0,6$ .

**Задача 6.** Степень поляризации  $P$  частично поляризованного света равна 0,5. Во сколько раз отличается максимальная интенсивность света, пропускаемого через анализатор, от минимальной?

*Решение.*

Степень поляризации  $P$  света по определению равна:

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}},$$

где  $I_{max}$  и  $I_{min}$ , соответственно, максимальная и минимальная интенсивности света, прошедшего через анализатор. Поделим числитель и знаменатель этой дроби на  $I_{min}$  и получим:

$$P = \frac{(I_{max}/I_{min}) - 1}{(I_{max}/I_{min}) + 1}.$$

Решая последнее уравнение относительно  $I_{max}/I_{min}$ , приходим к соотношению

$$\frac{I_{max}}{I_{min}} = \frac{1+P}{1-P}.$$

Подставляя сюда числовые данные задачи, получаем  $I_{max}/I_{min} = 3$ .

*Ответ:*  $I_{max}/I_{min} = 3$ .

**Задача 7.** На пути частично поляризованного света, степень поляризации  $P$  которого равна 0,6, поставили анализатор так, что интенсивность света, прошедшего через него, стала максимальной. Во сколько раз уменьшится интенсивность света, если плоскость пропускания анализатора повернуть на угол  $\alpha=30^\circ$ ?

*Решение.*

Согласно закону Малюса, если на поляризатор падает плоскополяризованный свет с интенсивностью  $I_{0p}$ , то интенсивность света на выходе поляризатора  $I_p$  будет равна

$I_p = I_{0p} \cos^2 \alpha$ , где  $\alpha$  - угол между плоскостью поляризации падающего света и плоскостью пропускания поляризатора. Если же на поляризатор падает естественный свет - неполяризованный свет со случайными хаотически изменяющимися направлениями колебаний светового вектора - то для определения интенсивности прошедшего света надо в соотношении Малюса произвести усреднение по всевозможным углам  $\alpha$ . Учитывая, что среднее значение  $\cos^2 \alpha$  равно

$$\langle \cos^2 \alpha \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \cos^2 \alpha d\alpha = \frac{1}{2},$$

получаем ослабление интенсивности падающего естественного света  $I_{0p}$  в два раза. Зная теперь, как поляризованный и естественный свет проходят через поляризатор, представим данный в задаче частично поляризованный свет в виде смеси естественного света с интенсивностью  $I_{0e}$  и плоскополяризованного света с интенсивностью  $I_{0p}$ . Если такую смесь пропустить через анализатор, то, как легко видеть с помощью закона Малюса, максимальная интенсивность прошедшего света будет равна

$$I_{max} = I_{0p} + (1/2) I_{0e},$$

а минимальная интенсивность  $I_{min} = (1/2) I_{0e}$ . Тогда степень поляризации этого света может быть определена следующим образом:

$$P = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} = \frac{I_{0p}}{I_{0p} + I_{0e}}.$$



По условию задачи сначала поляризатор установили так, что интенсивность прошедшего света оказалась максимальной, то есть  $I_{max}=I_{0p}+(1/2)I_{0e}$ . Плоскость поляризации поляризованной компоненты в этом случае совпадает с плоскостью пропускания поляризатора. Если теперь поляризатор повернуть на угол  $\alpha$ , то интенсивность поляризованной компоненты света уменьшится в соответствии с законом Малюса, а интенсивность прошедшей естественной компоненты не изменится и будет по-прежнему равна половине интенсивности естественной компоненты в падающем на поляризатор пучке света. В результате, интенсивность прошедшего света станет равной:

$$I_{\alpha} = \frac{1}{2}I_{0e} + I_{0p} \cos^2 \alpha.$$

Отношение интенсивностей  $I_{max}/I_{\alpha}$ , которое надо найти в задаче,

$$\frac{I_{max}}{I_{\alpha}} = \frac{I_{0p} + \frac{1}{2}I_{0e}}{\frac{1}{2}I_{0e} + I_{0p} \cos^2 \alpha}$$

выразим через отношение интенсивностей  $I_{0p}/I_{0e}$ , поделив числитель и знаменатель одновременно на  $I_{0e}$ . Тогда получим:

$$\frac{I_{max}}{I_{\alpha}} = \frac{\frac{I_{0p}}{I_{0e}} + \frac{1}{2}}{\frac{1}{2} + \frac{I_{0p}}{I_{0e}} \cos^2 \alpha}.$$

Подставив в последнее соотношение выражение для отношения интенсивностей  $I_{0p}/I_{0e}$  через степень поляризации  $P$  падающего света  $I_{0p}/I_{0e} = P/(1-P)$ , получим искомое отношение интенсивностей:

$$\frac{I_{max}}{I_{\alpha}} = \frac{\frac{P}{1-P} + \frac{1}{2}}{\frac{1}{2} + \frac{P}{1-P} \cos^2 \alpha}.$$

Используя численные условия задачи, находим:  $I_{max}/I_{\alpha}=1,23$ .

*Ответ:*  $I_{max}/I_{\alpha}=1,23$ .

### 3.3 Задачи для самостоятельного решения

**Задача 3.1.** Определить коэффициент отражения естественного света, падающего на стекло ( $n = 1,54$ ) под углом полной поляризации. Найти степень поляризации лучей, прошедших сквозь пластинку.

**Задача 3.2.** Луч естественного света проходит сквозь плоскопараллельную стеклянную пластинку ( $n = 1,54$ ), падая на нее под углом полной поляризации. Найти степень поляризации лучей, прошедших сквозь пластинку.

**Задача 3.3.** Определить: 1) коэффициент отражения и степень поляризации отраженных лучей при падении естественного света на стекло ( $n = 1,5$ ) под углом  $60^\circ$ ; 2) степень поляризации преломленных лучей.

**Задача 3.4.** Определить: 1) коэффициент отражения и степень поляризации отраженных лучей при падении естественного света на стекло ( $n = 1,5$ ) под углом  $45^\circ$ ; 2) степень поляризации преломленных лучей.

**Задача 3.5.** Найти коэффициент пропускания  $T$  при нормальном падении света из воздуха на стекло с показателем преломления  $n = 1,5$ .

**Задача 3.6.** Имеется  $m$  параллельных полупрозрачных плоскостей. Коэффициенты отражения и пропускания каждой из них равны  $\rho$  и  $\sigma$ . Найти коэффициент отражения  $\rho_m$  и коэффициент пропускания  $\sigma_m$  всей системы  $m$  плоскостей (относительно падающего света).

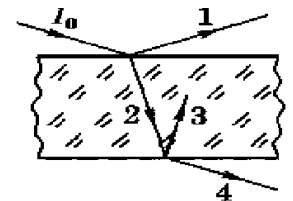
**Задача 3.7.** Степень поляризации частично поляризованного света  $P = 0,25$ . Найти отношение интенсивности поляризованной составляющей этого света к интенсивности естественной составляющей.

**Задача 3.8.** Проверить с помощью формул Френеля, что поток энергии падающей волны через границу раздела сред равен сумме потоков энергии преломленной и отраженной волн через ту же границу.

**Задача 3.9.** Показать с помощью формул Френеля для интенсивности света, что отраженный от поверхности диэлектрика свет будет полностью поляризован, если угол падения  $\theta_1$  удовлетворяет условию  $\operatorname{tg} \theta_1 = n$ , где  $n$  – показатель преломления диэлектрика. Каков при этом угол между отраженным и преломленным лучами.

**Задача 3.10.** Плоский пучок естественного света с интенсивностью  $I_0$  падает под углом Брюстера на поверхность воды. При этом  $\rho = 0,039$  светового потока отражается. Найти интенсивность преломленного пучка.

**Задача 3.11.** Узкий пучок естественного света падает под углом Брюстера на поверхность толстой плоскопараллельной прозрачной пластины. При этом от верхней поверхности отражается  $\rho = 0,080$  светового потока. Найти степень поляризации пучков 1–4.



**Задача 3.12.** На боковую грань призмы, изготовленной из стекла с показателем преломления  $n = 1,5$ , падает под углом Брюстера  $\varphi_{\text{Бр}}$  световой пучок, электрический вектор которого лежит в плоскости падения. Каким должен быть преломляющий угол  $A$  призмы, чтобы свет прошел через нее, не испытав потерь на отражение?

**Задача 3.13.** Свет падает из среды 1 на среду 2 под углом  $\varphi$  и преломляется под углом  $\psi$ . Доказать, что коэффициент отражения не изменится, если свет будет падать из среды 2 на среду 1 под углом  $\psi$ .

**Задача 3.14.** Угол Брюстера  $\varphi_{\text{Бр}}$  при падении света из воздуха на кристалл каменной соли равен  $57^\circ$ . Определить скорость света в этом кристалле. (Ответ:  $1,94 \cdot 10^8$  м/с.)

**Задача 3.15.** Угол  $\alpha$  между плоскостями пропускания поляризатора и анализатора равен  $45^\circ$ . Во сколько раз уменьшится интенсивность света, выходящего из анализатора, если угол увеличить до  $60^\circ$ ? (Ответ: в 2 раза.)

**Задача 3.16.** Во сколько раз ослабляется интенсивность света, проходящего через два поляризатора, плоскости пропускания которых образуют угол  $\alpha=30^\circ$ , если в каждом поляризаторе в отдельности теряется 10% интенсивности падающего на него света? (Ответ: в 3,3 раза.)

**Задача 3.17.** Пластинку кварца толщиной  $d_1=2$  мм, вырезанную перпендикулярно оптической оси, поместили между двумя поляризаторами, плоскости пропускания которых совпадают. После прохождения пластинки плоскость поляризации света повернулась на угол  $\varphi=53^\circ$ . Определить толщину  $d_2$  пластинки, при которой свет не проходит через анализатор. (Ответ:  $d_2=3,4$  мм.)

**Задача 3.18.** Никотин (чистая жидкость), содержащийся в стеклянной трубке длиной  $d=8$  см, поворачивает плоскость поляризации желтого света натрия на угол  $\varphi=137^\circ$ . Плотность никотина  $\rho=1,01 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Определить удельное вращение  $\alpha$  никотина. (Ответ:  $\alpha=169$  град/см.)

**Задача 3.19.** Анализатор в  $k=2$  раза уменьшает интенсивность света, проходящего к нему от поляризатора. Определить угол  $\alpha$  между плоскостями пропускания поляризатора и анализатора. Потерями света в анализаторе пренебречь. (Ответ:  $\alpha=45^\circ$ .)

**Задача 3.20.** На поляризатор падает пучок частично поляризованного света. При некотором положении поляризатора интенсивность света, прошедшего через него, стала минимальной. Когда плоскость пропускания поляризатора повернули на угол  $\beta=45^\circ$ , интенсивность света возросла в  $k=1,5$  раза. Определить степень поляризации  $P$  света. (Ответ:  $P=0,348$ .)

**Задача 3.21.** Пучок естественного света падает на стеклянную призму с показателем преломления  $n=1,6$ . Определить угол падения  $\theta$ , если отраженный пучок максимально поляризован. (Ответ:  $\theta=58^\circ$ .)

**Задача 3.22.** Степень поляризации частично поляризованного света  $P=0,25$ . Найти отношение интенсивности поляризованной составляющей этого света к интенсивности естественной составляющей. (Ответ: 0,3.)

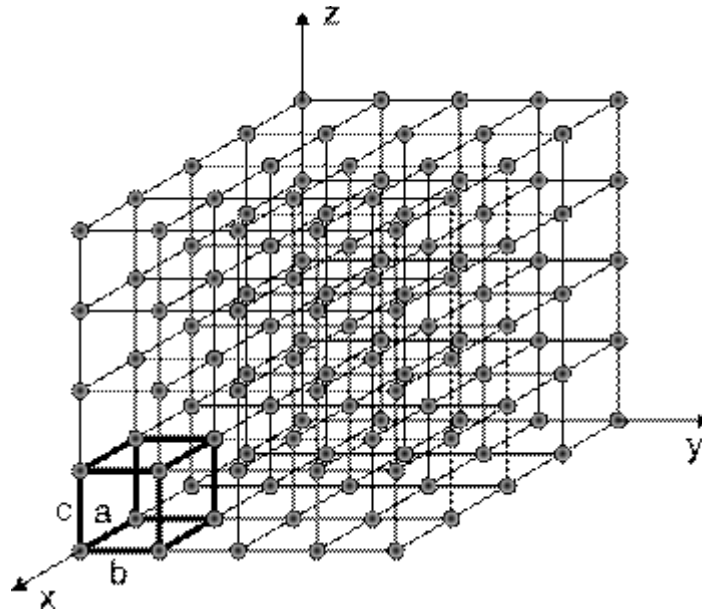
**Задача 3.23.** На пути частично поляризованного света поместили поляризатор. При повороте поляризатора на угол  $\varphi=60^\circ$  из положения, соответствующего максимуму пропускания, интенсивность прошедшего света уменьшилась в  $n=3$  раза. Найти степень поляризации падающего света. (Ответ:  $P=0,8$ .)

## 4 Кристаллическое состояние вещества

### 4.1 Основные понятия

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

Периодом решётки называется расстояние между центрами соседних ионов (атомов). Периоды  $a$ ,  $b$ ,  $c$  (рис. 4.1) выражаются в нанометрах ( $1\text{ нм} = 10^{-9}\text{ м} = 10\text{ \AA}$ ).



$a$ ,  $b$ ,  $c$  – периоды кристаллической решётки

Рисунок 4.1 - Схема кристаллической решётки

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

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

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

Пусть  $Z$  – число шаров, приходящихся на элементарную ячейку,  $N_i$  – число шаров внутри ячейки,  $N_f$  – число шаров на ее гранях,  $N_e$  – на ребрах,  $N_c$

– на вершинах ячейки. Тогда

$$Z = N_i + \frac{1}{2}N_f + \frac{1}{4}N_e + \frac{1}{8}N_c.$$

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

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

## 4.2 Примеры решения задач

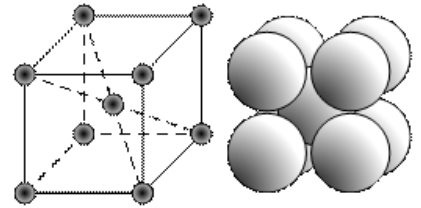
**Задача 1.** Найти базис  $Z$  объёмно-центрированной кубической решётки.

*Решение.*

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

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

*Ответ:*  $Z = 2$ .



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

*Решение.*

Коэффициент компактности  $\eta$  равен отношению суммарного объема атомов, входящих в решетку, к объему решетки:

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

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

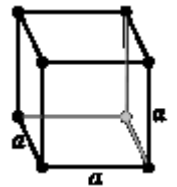
Пусть  $Z$  — число шаров, приходящихся на элементарную ячейку,  $N_i$  — число шаров внутри ячейки,  $N_f$  — число шаров на ее гранях,  $N_e$  — на ребрах,  $N_c$  — на вершинах ячейки. Тогда  $Z = N_i + \frac{1}{2}N_f + \frac{1}{4}N_e + \frac{1}{8}N_c$ .

Для примитивной кубической ячейки

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

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

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



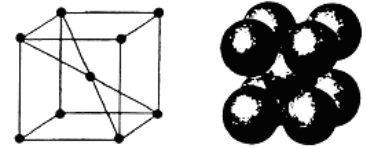
## 4.3 Задачи для самостоятельного решения

**Задача 4.1.** Найти базис  $Z$  и координационное число  $K$  для гранецентрированной кубической решётки.

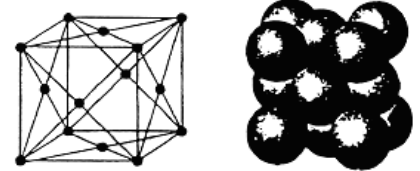
**Задача 4.2.** Найти базис  $Z$  и координационное число  $K$  для гексагональной плотноупакованной решётки.

**Задача 4.3.** Найти базис  $Z$  и координационное число  $K$  для ромбической базоцентрированной решётки.

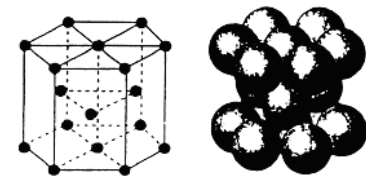
**Задача 4.4.** Вычислить коэффициент компактности для объемно-центрированной кубической решетки.



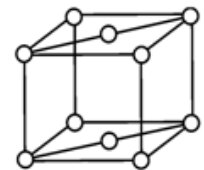
**Задача 4.5.** Вычислить коэффициент компактности для гранецентрированной кубической решетки.



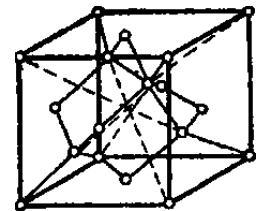
**Задача 4.6.** Вычислить коэффициент компактности для гексагональной плотноупакованной решетки.



**Задача 4.7** Вычислить коэффициент компактности для кубической базоцентрированной решетки.



**Задача 4.8.** Вычислить коэффициент компактности для алмазной решетки.



## 5 Линейные и нелинейные оптические материалы (диэлектрики)

### 5.1 Основные понятия

#### Поляризация диэлектриков. Виды диэлектрических сред

*Поляризация* – направленное перемещение в материале большого количества связанного заряда на ничтожно малые расстояния, соизмеримые, или меньше, чем межатомные расстояния. В результате этого диэлектрик приобретает электрический момент. Т.о., поляризация – это состояние вещества, характеризующееся тем, что электрический момент данного объема этого вещества имеет значение, отличное от нуля.

*Электрическим моментом* диполя называется вектор, направление которого совпадает с направлением от отрицательного компонента диполя к положительному, а величина его равна произведению абсолютного значения одного из зарядов диполя  $q$  на его плечо  $l$ .

$$\vec{\mu} = q \cdot \vec{l}. \quad (4.1)$$

Мерой поляризации является величина, равная электрическому моменту единицы объема, которая и называется *поляризованностью*.

$$\vec{P} = \frac{\vec{M}}{V}. \quad (4.2)$$

Поляризованность равна поверхностной плотности связанных зарядов в диэлектрике.

Главной характеристикой, отражающей электрические свойства диэлектрика, является зависимость поляризованности (как реакции на внешнее воздействие) от напряженности поля (как внешнего воздействия). Опыт и теория показывают, что для подавляющего большинства диэлектриков зависимость  $P(E)$  является линейной, а направления векторов  $\mathbf{P}$  и  $\mathbf{E}$  совпадают. Такие диэлектрики называются *линейными изотропными*, и для них, вместо характеристики  $P(E)$  можно ввести параметр — коэффициент пропорциональности между  $P$  и  $E$ , называемый *абсолютной диэлектрической восприимчивостью*:

$$P = \chi_a \cdot E \Rightarrow \boxed{\chi_a = P/E} \quad (4.3)$$

Чаще, однако, для описания чувствительности диэлектрика к действию поля используется безразмерная величина, называемая *относительной диэлектрической восприимчивостью*, равная отношению абсолютной восприимчивости к диэлектрической постоянной:  $\chi = \chi_a / \varepsilon_0$ . В результате,

$$P = \varepsilon_0 \cdot \chi \cdot E \Rightarrow \boxed{\chi = P / \varepsilon_0 \cdot E} \quad (4.4)$$

Диэлектрик называется *линейным*, если в каждой его области абсолютные значения напряженности поля и поляризованности пропорциональны друг другу,  $P \sim E$ , при условии, что направление вектора  $\mathbf{E}$  неизменно. В противном случае диэлектрик *нелинейен*.

Условие, поставленное в определении, можно опустить для так называемых *изотропных диэлектриков*, которые используются на практике чаще, чем *анизотропные*.

Диэлектрик является *изотропным*, если в нем вектор  $\mathbf{P}$  всегда совпадает по направлению с вектором  $\mathbf{E}$ . В противном случае диэлектрик *анизотропен*.

## 5.2 Примеры решения задач

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

*Решение.*

Для расчета  $\varepsilon$  используем формулу Лихтенеккера в виде

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

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

$TK\varepsilon = \Theta_1 TK\varepsilon_1 + \Theta_2 TK\varepsilon_2$  (Это можно получить, продифференцировав формулу Лихтенеккера).

Решаем систему уравнений

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

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

В результате получим

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

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

$$\varepsilon = 43,4.$$

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

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

*Решение.*

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

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

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

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

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

*Решение.*

Поляризованность есть электрический момент единицы объема:

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

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

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

### 5.3 Задачи для самостоятельного решения

**Задача 5.1.** Электрический момент молекулы HCl равен  $1,04 \text{ Дб}$ . Если считать, что заряд эквивалентного ей диполя равен одному элементарному заряду, то чему равен размер плеча диполя? (Ответ:  $2,91 \cdot 10^{-12} \text{ м}$ )



**Задача 5.2.** Электрический момент молекулы  $\text{HCl}$ , помещенной в электрическое поле с напряженностью  $2 \cdot 10^6$  В/м равен 1,04 Дб. Продольная ось молекулы ориентирована под углом  $60^\circ$  относительно направления вектора напряженности. Чему равен момент сил, действующий на молекулу в электрическом поле? (Ответ:  $8,075 \cdot 10^{-25}$  Н·м)

**Задача 5.3.** Поляризованность, созданная в диэлектрике электрическим полем с напряженностью  $2 \cdot 10^7$  В/м, составляет  $8 \cdot 10^{-6}$  Кл/м<sup>2</sup>. Чему равна относительная проницаемость диэлектрика? (Ответ: 1,045)

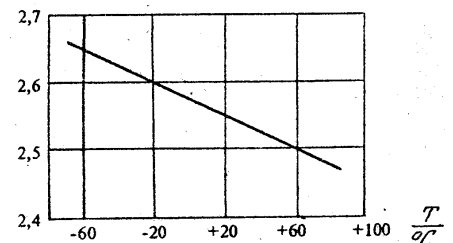
**Задача 5.4.** У ионного кристалла с одним типом примеси при температуре минус  $20^\circ\text{C}$  статическая (в постоянном поле) относительная восприимчивость ионно-релаксационной поляризации равна 6,6, чему равна относительная восприимчивость при  $100^\circ\text{C}$ ? Дайте ответ на основе теоретической формулы для слабых полей (Ответ: 4,477)

**Задача 5.5.** У кристаллического диэлектрика с одним типом примеси при температуре минус  $20^\circ\text{C}$  время релаксации ионно-релаксационной поляризации равно  $1,2 \cdot 10^{-6}$  с, при  $100^\circ\text{C}$  оно равно  $1,2 \cdot 10^{-8}$  с, чему равно время релаксации при  $30^\circ\text{C}$ ? Дайте ответ на основе теоретической формулы для слабых полей (Ответ:  $1,131 \cdot 10^{-7}$  с)

**Задача 5.6.** При включении постоянного напряжения 200 В поляризованность, обусловленная релаксационной поляризацией, изменяется со временем  $t$  (в секундах) по закону  $P(t) = 5,42 \cdot 10^{-6} [1 - \exp(-400t)]$  Кл/м<sup>2</sup>. Чему равно время релаксации  $\tau$  в миллисекундах. (Ответ: 2,5 мс)

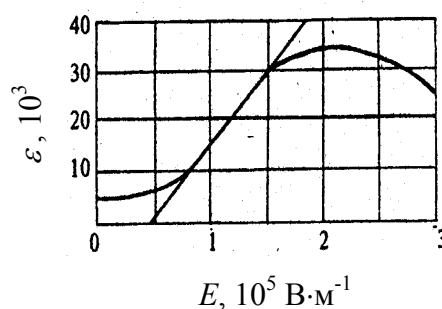
**Задача 5.7.** При включении постоянного напряжения 200 В поляризованность, обусловленная релаксационной поляризацией, изменяется со временем  $t$  (в секундах) по закону  $P(t) = 5,42 \cdot 10^{-6} [1 - \exp(-400t)]$  Кл/м<sup>2</sup>. Чему равна поляризованность в момент времени  $t = 2\tau$  после выключения напряжения? (Ответ:  $0,7335$  мкКл/м<sup>2</sup>)

**Задача 5.8.** На рисунке представлен график зависимости диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  полистирола от температуры  $T$ . Чему равен температурный коэффициент диэлектрической проницаемости при  $T = -60^\circ\text{C}$ ? (Ответ:  $-4,72 \cdot 10^{-4}$  К<sup>-1</sup>)



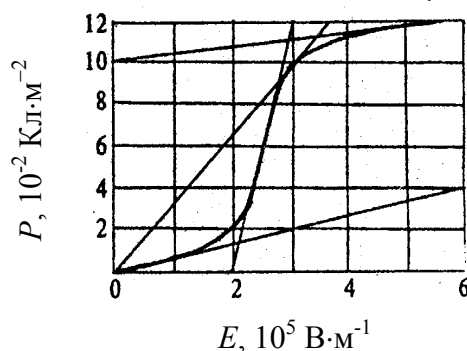
**Задача 5.9.** Известно, что ниобат калия кристаллизуется в структуре перовскита с периодом решетки  $c \approx a = 0,4$  нм. Определить электрический дипольный момент на одну элементарную ячейку, если спонтанная поляризованность этого сегнетоэлектрика  $P = 0,3$  мкКл·м<sup>-2</sup>.

**Задача 5.10.** На рисунке представлен график зависимости поляризованности  $P$  сегнетокерамики от напряженности электрического поля  $E$  и даны касательные к различным точкам кривой. Чему равна максимальная относительная диэлектрическая проницаемость сегнетокерамики? (Ответ: 3,8)



**Задача 5.11.** На рисунке представлен график зависимости поляризованности  $P$  сегнетокерамики от напряженности электрического поля  $E$  и даны касательные к различным точкам кривой. На сколько отличается значение электрической индукции от значения поляризованности при напряженности поля  $2 \cdot 10^5$  В/м? Положительное число в ответе означает, что индукция больше поляризованности, отрицательное число означает обратное. (Ответ:  $1,77 \cdot 10^{-6}$  Кл/м<sup>2</sup>)

**Задача 5.12.** На рисунке представлен график зависимости диэлектрической проницаемости сегнетокерамики от напряженности электрического поля и дана касательная к точке перегиба графика. На сколько отличается значение электрической индукции при напряженности поля  $3 \cdot 10^5$  В/м от значения электрической индукции при напряженности поля  $1,5 \cdot 10^5$  В/м? Положительное число в ответа означает, что значение индукции при  $3 \cdot 10^5$  В/м больше, а отрицательное число означает обратное. (Ответ:  $0,03$  Кл/м<sup>2</sup>)



**Задача 5.13.** На рисунке представлен график зависимости диэлектрической проницаемости сегнетокерамики от напряженности электрического поля. На сколько отличается значение электрической индукции от значения поляризованности при напряженности поля  $1,5 \cdot 10^5$  В/м? Положительное число в ответа означает, что индукция больше поляризованности, отрицательное число означает обратное. (Ответ:  $1,33 \cdot 10^{-6}$  Кл/м<sup>2</sup>)

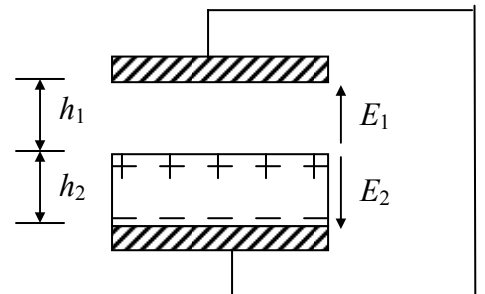
**Задача 5.14.** Сегнетоэлектрик с прямоугольной петлей гистерезиса имеет коэрцитивную силу  $2 \cdot 10^4$  В/м и остаточную индукцию  $8 \cdot 10^{-2}$  Кл·м<sup>-2</sup>. Чему равна тепловая мощность выделяемая в единице объема сегнетоэлектрика при воздействии синусоидального электрического поля

частотой 50 Гц и амплитудой? Петлю гистерезиса считайте идеально прямоугольной. (Ответ:  $8 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>3</sup>)

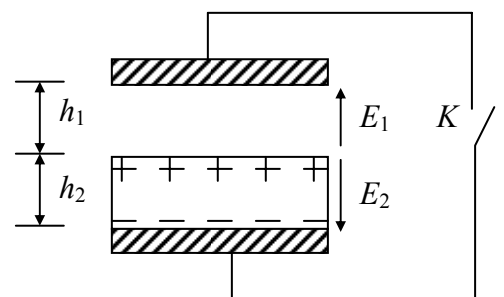
**Задача 5.15.** Из двух пьезокристаллических материалов  $A$  и  $B$ , различных по составу, но имеющих одинаковую кристаллическую структуру изготовили два одинаковых по форме цилиндрических стержня длиной 5 см и диаметром 3 мм. Линия продольного пьезоэффекта в обоих стержнях совпадает с их геометрическими осями. Масса стержня  $A$  равна 0,7 г, стержня  $B$  - 1,9 г. Модуль продольной упругости стержня  $A$  равен  $2,9 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>, а стержня  $B$  - на  $5,6 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>. Во сколько раз частота первой гармоники пьезорезонанса стержня  $A$  отличается от частоты первой гармоники стержня  $B$ ? В ответе укажите отношение частоты первой гармоники стержня  $A$  к частоте первой гармоники стержня  $B$ . (Ответ: 1,185)

**Задача 5.16.** Из двух пьезокристаллических материалов  $A$  и  $B$ , различных по составу, но имеющих одинаковую кристаллическую структуру требуется изготовить цилиндрические стержни для пьезорезонаторов с одинаковой частотой продольного резонанса и одинаковым сечением, имеющим площадь 5 мм<sup>2</sup>. Линия продольного пьезоэффекта в обоих стержнях совпадает с их геометрическими осями. Плотность стержня  $A$  равна 2500 кг/м<sup>3</sup>, стержня  $B$  - 4000 кг/м<sup>3</sup>. Модуль продольной упругости стержня  $A$  равен  $2,9 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>, а стержня  $B$  - на  $5,6 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>. Если длина стержня  $A$  равна 5 см, то чему равна длина стержня  $B$ ? (Ответ: 5,5 см)

**Задача 5.17.** У пластинки электрета поверхностная плотность связанных зарядов равна  $4,42 \cdot 10^{-6}$  Кл/м<sup>2</sup>, диэлектрическая проницаемость  $\epsilon=3$ . Толщина пластинки 1 мм. Пластинка помещена между обкладками конденсатора, расположенными на расстоянии 1,5 мм и имеющими площадь 5 см<sup>2</sup> (см. рисунок). Чему равна плотность зарядов на верхнем электроде (см. рисунок)? (Ответ:  $1,7$  мкКл/м<sup>2</sup>)



**Задача 5.18.** У пластинки электрета поверхностная плотность связанных зарядов равна  $4,42 \cdot 10^{-6}$  Кл/м<sup>2</sup> диэлектрическая проницаемость  $\epsilon=3$ . Толщина пластинки 1 мм. Пластинка помещена между обкладками конденсатора, электроды которого замкнуты (ключ  $K$  замкнут, см. рисунок) и плотно прижаты к поверхностям электрета (расстояние  $h_1 = 0$ ). Площадь электродов 5 см<sup>2</sup>. Чему равна разность потенциалов между электродами, если сначала разомкнуть ключ  $K$ , а затем поднять верхний



электрод на расстояние 1,2 мм над поверхностью электрета? Окружающая среда - воздух при нормальных условиях.

*Примечание.* При решении рекомендуется использовать формулу плоского конденсатора и формулу для вычисления эффективной диэлектрической проницаемости неоднородного диэлектрика. Возможны и другие способы решения. (Ответ: 760 В).

**Задача 5.19.** Из кристалла пьезоэлектрического кварца вырезана перпендикулярно электрической оси  $X$  пластинка толщиной 1 мм. Вдоль этой оси пьезомодуль продольного пьезоэффекта  $d_{11}=2,3 \cdot 10^{-12}$  Кл/Н. Если механическое напряжение, равное  $10^5$  Н/м<sup>2</sup>, направлено вдоль оси  $X$ , то чему будет равна разность электрических потенциалов между противоположными плоскостями пластинки? Диэлектрическая проницаемость кварца  $\epsilon = 4,5$ . (Ответ: 5,7 В).

## 6 Проведение мини-конференций

На мини-конференциях заслушиваются и обсуждаются доклады студентов и сотрудников кафедры ЭП, сделанные на конференциях. Например, в 2011 году были сделаны доклады (фамилии студентов подчеркнуты) на:

1. Международной конференции «Asia-Pacific Conference on Fundamental Problems of Opto- and Microelectronics APCOM-2011»

A.S. Akrestina, M.G. Kisteneva, S.M. Shandarov, V.V. Popugaeva, Yu. F. Kargin. Spectral Dependences of Light-Induced Absorption in  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca},\text{Ga}$  Crystal.

2. Международной конференции «FIRST EUROMEDITERRANEAN MEETING ON FUNCTIONALIZED MATERIALS EMM-FM 2011»

A.S. Akrestina, M.G. Kisteneva, S.M. Shandarov, V.V. Popugayeva, Yu.F.Kargin. Photoinduced changes of the optical absorption in  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca},\text{Ga}$  crystal // First Euro-Mediterranean Meeting on Functionalized Materials “EMM-FM 2011”, Tunisia. Proceedings. P. 53 – 54.

3. 9-й Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом (ВИТТ-2011)», 20 – 22 сентября 2011 г., Минск, Беларусь.

М.Г. Кистенева, А.С. Акрестина, С.М. Шандаров, А.Е. Мандель, А.Н. Гребенчуков, Л.А. Кабанова, Ю.Ф. Каргин. Влияние отжига в вакууме на спектральные зависимости оптического поглощения в кристалле силиката висмута // Материалы 9-й Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом (ВИТТ-2011)». Минск, 20 – 22 сентября 2011 г. / Под ред. В.М. Анищик. – Минск: Изд. Центр БГУ, 2011. – 469 с.

4. VII Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика - 2011» Акрестина А.С., Кистенева М.Г., Кабанова Л.А., Гребенчуков А.Н., Шандаров С.М., Каргин Ю.Ф. Спектральные зависимости оптического поглощения в кристалле силиката висмута, подвергнутом отжигу в вакууме // Сборник трудов VII международной конференции

молодых ученых и специалистов «Оптика-2011», Санкт-Петербург, 17-21 октября 2011. С.67-69.

5. Photorefractive Materials, Effects, and Devices Light in Structured Nonlinear Materials. Ensenada, Mexico, 2011.

Stanislav.Shandarov, Marina.Kisteneva, Anna.Akrestina, Arkady Mandel', Alexander Grebenchukov, Ludmila Kabanova, and Yuryi Kargin. Effect of vacuum and air annealing on spectrum of optical absorption of  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  crystals

6. Научно-технической конференции-семинаре по фотонике и информационной оптике 26–28 января 2011 г., Москва.

М.Г. Кистенева, А.С. Акрестина, В.В. Попугаева, С.М. Шандаров, С.В. Смирнов, Ю.Ф. Каргин. Фотоиндуцированные изменения оптического поглощения в кристалле  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca}$ ,  $\text{Ga}$ , наведенные инфракрасным лазерным излучением // Научная сессия НИЯУ МИФИ - 2011. Научно-техническая конференция семинар по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов. М. НИЯУ МИФИ, 2011. – С. 106-107.

## 7 Представление презентаций и защита рефератов

Студенты по одной из выбранной темы пишут реферат или делают презентацию на практических занятиях.

Темы для самостоятельного изучения

1. Материалы для записи информации.
2. Материалы для волоконной и интегральной оптики.
3. Оптические ситаллы. Марки ситаллов.
4. Стекла для активных тел ОКГ.
5. Стекла для волоконно-оптических элементов.
6. Кристаллы: диэлектрики и полупроводники.
7. Кристаллы для инфракрасной области спектра.
8. Жидкие кристаллы.
9. Фоторефрактивные материалы.
10. Электрооптические материалы.
11. Типы рассеяния света оптическими средами. Классификация светорассеивающих материалов.
12. Типы и марки полимеров, используемых в оптическом приборостроении. Их свойства.
13. Оптические поликристаллы (керамика). Ее свойства, способы получения.
14. Светодиоды.

## 8 Список литературы

1. 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

2. Материалы электронной техники: Учебник для вузов / Владимир Васильевич Пасынков, Валерий Сергеевич Сорокин. - 4-е изд., стереотип. - М. : ДМК, 2002 ; СПб. : Лань, 2002. - 368 с. - ISBN 5-9511-0011-9 (в пер.)

3. Материалы электронной техники: Задачи и вопросы: Учебное пособие для вузов / Б. Л. Антипов, В. С. Сорокин, В. А. Терехов. - 2-е изд. - СПб. : Лань, 2003. - 208 с. - ISBN 5-8114-0410-7

4. Никоноров Н.В. Оптическое материаловедение: Основы прочности оптического стекла: Учебное пособие, курс лекций / Никоноров Н.В., Евстропьев С.К. // СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 102 с. URL: <http://books.ifmo.ru/book/pdf/622.pdf> (дата обращения 28.01.2012).

5. Немиллов С.В. Оптическое материаловедение: Оптические стекла: Учебное пособие, курс лекций // СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. – 175 с. URL: <http://books.ifmo.ru/book/pdf/831.pdf> (дата обращения 28.01.2012).

6. Никоноров Н.В. Оптическое материаловедение. Ч.1: Оптические свойства и дефекты кристаллов: Учебное пособие к выполнению лабораторных работ по курсу «Оптическое материаловедение» / Никоноров Н.В., Пржеvusкий А.К., Асеев В.А., Игнатьев А.И., Каева Е.С., Маколкина Е.Н., Рохмин А.С., Ульященко А.М.// СПб: СПбГУ ИТМО, 2005. – 73 с. URL: <http://books.ifmo.ru/book/pdf/87.pdf> (дата обращения 28.01.2012).

7. Вильчинская С.С. Оптические материалы и технологии: учебное пособие / С.С. Вильчинская, В.М. Лисицын; Томский политехнический университет – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2011. – 107 с. URL: [http://portal.tpu.ru/departments/otdel/publish/catalog/2011/departments/ifvt/metod/avtor/ifvt\\_vilchinskaya\\_Opticheskie\\_materialy\\_i\\_tehnologii.pdf](http://portal.tpu.ru/departments/otdel/publish/catalog/2011/departments/ifvt/metod/avtor/ifvt_vilchinskaya_Opticheskie_materialy_i_tehnologii.pdf) (дата обращения 31.01.2012).

Учебное пособие

Кистенева М.Г.

## ОПТИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Методические указания к практическим занятиям  
по дисциплине «Оптическое материаловедение»

Усл. печ. л.                      Препринт  
Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники  
634050, г.Томск, пр.Ленина, 40