

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

Кафедра электронных приборов

## **ОПТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА**

Методические указания к практическим занятиям  
для студентов направления 200700.62 - «Фотоника и  
оптоинформатика»

2013

## **Шандаров, Станислав Михайлович**

Оптическая физика : методические указания к практическим занятиям для студентов направления 200700.62 - «Фотоника и оптоинформатика» / С.М. Шандаров; 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, 2013. – 27 с.

В предлагаемом пособии приводится значительное число узловых задач с решениями. Решение задач позволяет уяснить физический смысл явлений, закрепляет навыки применения теоретических знаний. Это позволяет развить навыки самостоятельной работы и делать расчеты в условиях, приближенных к практике.

В результате решения задач студент приобретает

- способность идентифицировать новые области исследований, новые проблемы в сфере профессиональной деятельности (ПК-9);
- готовность формулировать цели и задачи научных исследований (ПК-10).

Предназначено для студентов очной, очно-заочной и заочной форм, обучающихся по направлению 200700.62 - «Фотоника и оптоинформатика» по курсу «Оптическая физика».

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  
« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2013 г.

## **ОПТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА**

Методические указания к практическим занятиям  
для студентов направления 200700.62 - «Фотоника и  
оптоинформатика»

Разработчик  
д-р. физ.-мат. наук, проф.  
каф. ЭП  
\_\_\_\_\_ С.М. Шандаров  
« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2013 г.

## Содержание

Практическое занятие 1. Электромагнитные колебания и волны.....	5
1.1 Примеры решения задач по теме .....	5
1.2 Задачи для проработки темы.....	7
Практическое занятие 2. Отражение и преломление плоских электромагнитных волн на плоской границе раздела.....	13
2.1 Примеры решения задач по теме «Отражение и преломление плоских электромагнитных волн на плоской границе раздела».....	13
2.2 Задачи для проработки темы.....	14
Практическое занятие 3. Интерференция света .....	16
3.1 Примеры решения задач по теме .....	16
3.2 Задачи для проработки темы.....	17
Практическое занятие 4. Дифракция света .....	19
4.1 Примеры решения задач по теме .....	19
4.2 Задачи для проработки темы.....	20
Практическое занятие 5. Оптика анизотропных сред.....	21
5.1 Примеры решения задач по теме .....	21
5.2 Задачи для проработки темы.....	22
Рекомендуемая литература .....	25

## Практическое занятие 1. Электромагнитные колебания и волны

В результате решения задач студент приобретает:

- способность идентифицировать новые области исследований, новые проблемы в сфере профессиональной деятельности (ПК-9);
- готовность формулировать цели и задачи научных исследований (ПК-10).

### 1.1 Примеры решения задач по теме

#### Задача 1.

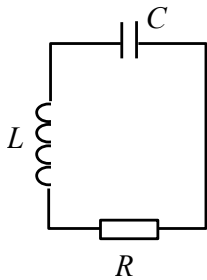


Рис.

Для последовательного колебательного контура (см. рис.) с параметрами  $L = 4$  мкГн,  $C = 25$  пФ,  $R = 8$  Ом найти зависимость напряжения на конденсаторе от времени, если в момент времени  $t = 0$  напряжение на конденсаторе  $U_C(0) = 0$ , а напряжение на сопротивлении потерь  $U_R(0) = U_{R0} = 1$  В.

**Решение.** Воспользуемся уравнением свободных колебаний заряда в рассматриваемом последовательном колебательном контуре:

$$\ddot{q} + 2\gamma \dot{q} + \omega_0^2 q = 0, \quad (1.1)$$

где  $\gamma = R/2L$  и  $\omega_0^2 = 1/LC$ . Этому однородному дифференциальному уравнению с постоянными коэффициентами соответствует характеристическое уравнение

$$p^2 + 2\gamma p + \omega_0^2 = 0, \quad (1.2)$$

корни которого имеют вид

$$p_{1,2} = -\gamma \pm \sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2}, \quad (1.3)$$

а их характер определяется соотношением между собственной частотой колебаний в контуре  $\omega_0$  в отсутствие потерь и коэффициентом  $\gamma$ , определяющим эти потери. Для рассматриваемого контура находим:

$$\omega_0 = \sqrt{1/LC} = 1 \cdot 10^8 \text{ рад/с}, \quad \gamma = R/2L = 1 \cdot 10^6 \text{ 1/с},$$

то есть выполняется условие  $\omega_0 > \gamma$ . Таким образом, корни характеристического уравнения (1.2) являются комплексно-сопряженными и могут быть представлены в виде

$$p_{1,2} = -\gamma \pm i\omega_1, \quad (1.4)$$

где  $\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2}$ . В результате общее решение рассматриваемого однородного дифференциального уравнения с постоянными

коэффициентами (1.1) может быть представлено в виде суперпозиции двух экспоненциальных функций

$$q(t) = A \exp(p_1 t) + B \exp(p_2 t). \quad (1.5)$$

С учетом (1.4) отсюда получаем

$$q(t) = \exp(-\gamma t) [A \exp(i\omega_1 t) + B \exp(-i\omega_1 t)], \quad (1.6)$$

где произвольные постоянные  $A$  и  $B$  должны быть определены из заданных начальных условий. Учитывая соотношение

$$U_C(t) = \frac{q(t)}{C} \quad (1.7)$$

и начальное условие  $U_C(0) = 0$ , получаем, что  $B = -A$  и временная зависимость (1.6) с использованием формулы Эйлера приводится к виду

$$q(t) = q_m \exp(-\gamma t) \sin(\omega_1 t), \quad (1.8)$$

с максимальным значением амплитуды колебаний заряда  $q_m = i2A$ , наблюдаемым в момент времени  $t=0$ . Эту амплитуду можно найти с использованием закона Ома

$$U_R(t) = RI(t) = R \frac{dq}{dt}, \quad (1.9)$$

и второго заданного начального условия  $U_R(0) = U_{R0} = 1$  В. В результате получаем:

$$q_m = \frac{U_{R0}}{R\omega_1}, \quad (1.10)$$

что позволяет с учетом соотношений (1.7) и (1.8) найти зависимость напряжения на конденсаторе от времени, как

$$U_C(t) = U_m \exp(-\gamma t) \sin(\omega_1 t),$$

с максимальным значением амплитуды, наблюдаемым в момент времени  $t=0$ , равным  $U_m = U_{R0} / (CR\omega_1) \approx U_{R0} / (CR\omega_0) = 50$  В. Здесь учтено, что частота  $\omega_1$  незначительно отличается от  $\omega_0$ .

**Ответ:** Зависимость напряжения на конденсаторе от времени определяется выражением

$$U_C(t) = U_m \exp(-\gamma t) \sin(\omega_1 t),$$

с параметрами  $U_m = U_{R0} / (CR\omega_1) \approx U_{R0} / (CR\omega_0) = 50$  В,  $\omega_1 \approx \omega_0 = 1 \cdot 10^8$  рад/с и  $\gamma = 1 \cdot 10^6$  с<sup>-1</sup>.

**Задача 2.** В однородной изотропной непроводящей среде отсутствуют свободные заряды и сторонние токи.

Используя систему уравнений Максвелла, выведите общее уравнение, которому должна удовлетворять напряженность магнитного поля.

**Решение.** Уравнения Максвелла для однородной непроводящей изотропной среды, в которой отсутствуют свободные заряды и сторонние

токи, с учетом материальных уравнений  $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$ ,  $\vec{B} = \mu \vec{H}$  и  $\vec{\delta}_{compl} = \vec{\delta}_{disp} = \partial \vec{D} / \partial t$  принимают вид

$$\text{rot } \vec{H} = \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \quad (1.11)$$

$$\text{rot } \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \quad (1.12)$$

$$\text{div } \vec{E} = 0, \quad (1.13)$$

$$\text{div } \vec{H} = 0. \quad (1.14)$$

Применим к уравнению (1.11) операцию rot:

$$\text{rot rot } \vec{H} = \epsilon \text{rot } \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}. \quad (1.15)$$

Изменяя в правой части (1.15) порядок действия на векторную функцию  $\vec{E}$  независимых операторов rot и  $\partial / \partial t$ , с учетом (1.12) получаем:

$$\text{rot rot } \vec{H} = -\epsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2}. \quad (1.16)$$

Используя далее тождество  $\text{rot rot} \equiv \text{grad div} - \nabla^2$ , справедливое для любых векторных функций и уравнение (1.14)  $\text{div } \vec{H} = 0$ , из (1.16) получаем, что напряженность магнитного поля должна удовлетворять следующему волновому уравнению:

$$\nabla^2 \vec{H} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0. \quad (1.17)$$

**Ответ:** Напряженность магнитного поля должна удовлетворять волновому уравнению:

$$\nabla^2 \vec{H} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0.$$

## 1.2 Задачи для проработки темы

**Задача 1.1.** Заряженная частица с массой  $m = 2 \cdot 10^{-26}$  кг совершает гармонические колебания вдоль оси  $x$  относительно положения равновесия  $x = 0$  и характеризуется потенциальной энергией  $U(x) = (bx)^2$ , где  $b = 2\pi$  Дж<sup>1/2</sup>/м.

Вычислите частоту колебаний частицы в Гц и соответствующую длину волны электромагнитного излучения.

**Задача 1.2.** Заряженная частица с массой  $m = 1 \cdot 10^{-26}$  кг совершает гармонические колебания вдоль оси  $x$  относительно положения равновесия

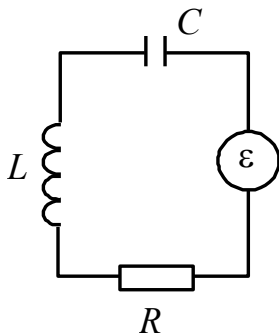
$x = x_0$  и характеризуется потенциальной энергией  $U(x) = b(x - x_0)^2$ , где  $b = 2\pi^2$  Дж/м<sup>2</sup>.

Вычислите частоту колебаний частицы в Гц, соответствующую длину волны электромагнитного излучения и его волновое число.

**Задача 1.3.** Для последовательного колебательного контура с параметрами  $L = 9$  мкГн,  $C = 16$  пФ,  $R = 4$  Ом найти зависимость напряжения на конденсаторе от времени, если в момент времени  $t = 0$  напряжение на конденсаторе  $U_C(0) = 10$  В, а напряжение на сопротивлении потерь  $U_R(0) = 0$  В.

**Задача 1.4.** Для последовательного колебательного контура с параметрами  $L = 9$  мкГн,  $C = 36$  пФ,  $R = 18$  Ом найти зависимость напряжения на сопротивлении потерь от времени, если в момент времени  $t = 0$  напряжение на конденсаторе  $U_C(0) = 0$ , а напряжение на сопротивлении потерь  $U_R(0) = 2$  В.

**Задача 1.5.** В последовательном колебательном контуре действует электродвижущая сила  $E(t) = E_m \cos(\omega t)$ . Найдите закон изменения во времени заряда конденсатора  $q(t)$ , при условии  $R/2L < 1/\sqrt{LC}$  и проанализируйте полученное решение при  $t \gg 2L/R$ , приведя его к тригонометрической форме.



При численном анализе принять  $L = 16$  мкГн,  $C = 64$  пФ,  $R = 50$  Ом.

**Задача 1.6.** Для найденной в **Задаче 5** функции  $q(t)$  постройте зависимость амплитуды колебаний заряда конденсатора от частоты  $\omega$ .

**Задача 1.7.** Для колебательного процесса, заданного при  $0 \leq t \leq 10T_0$  в виде зависимости

$$x(t) = 10 \left( 1 - \frac{t}{10T_0} \right) \sin \left( \frac{2\pi}{T_0} t \right),$$

нарисуйте примерную фазовую траекторию.

**Задача 1.8.** Для колебательного процесса, заданного при  $0 \leq t \leq 4T_0$  в виде зависимости



$$q(t) = 10 \left( 1 - \frac{t}{4T_0} \right) \cos \left( \frac{2\pi}{T_0} t \right),$$

нарисуйте примерную фазовую траекторию.

**Задача 1.9.** Для колебательного процесса, заданного при  $0 \leq t \leq 4T_0$  в виде зависимости

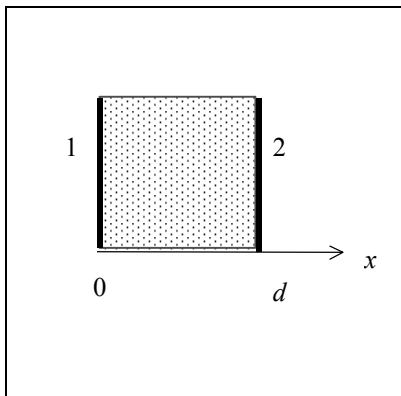
$$x(t) = 1 \left( 1 + \frac{t}{T_0} \right) \cos \left( \frac{2\pi}{T_0} t \right),$$

нарисуйте примерную фазовую траекторию.

**Задача 1.10.** Из уравнений Максвелла показать, что линии полного тока непрерывны.

**Задача 1.11.** Из условия непрерывности линий полного тока и уравнений Максвелла найти связь плотности объемного заряда с токами проводимости, считая токи переноса отсутствующими.

**Задача 1.12.**



Проводящий диэлектрик, изображенный на рисунке, заключен между обкладками плоского конденсатора, отключенного от внешних источников. В момент времени  $t = 0$  разность потенциалов на обкладках 1 и 2 составляла  $U_0 = 100$  В. Найти зависимость напряженности электрического поля в диэлектрике от времени, если  $\varepsilon = 30\varepsilon_0$ ,  $\sigma = 10^{-9} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$ ,  $d = 10$  мм.

**Задача 1.13.** Найти распределение объемного заряда, создающее поле вектора электрической индукции  $\vec{D} = A\vec{r}$ , где  $A = 10^{-6} \text{ Кл/м}^3$ ,  $\vec{r}$  - радиус - вектор точки.

**Задача 1.14.** Может ли быть поле  $\vec{e} = A(\mu x - \vec{j}y)$  полем вектора магнитной индукции?

**Задача 1.15.** В диэлектрической среде ( $\sigma = 0$ ) с параметрами  $\varepsilon = \varepsilon_0$  и  $\mu = \mu_0$  напряженность электрического поля задана в виде:

$$\vec{E} = E_m \vec{i} \sin(\omega t) \sin(kz)$$

Найдите поле вектора магнитной индукции в этой среде.

**Задача 1.16.** Плоская электромагнитная волна распространяется вдоль оси  $z$  и имеет в некоторый момент времени ориентацию вектора напряженности магнитного поля вдоль оси  $x$ . Нарисуйте взаимную ориентацию волнового вектора и остальных векторов в волне, в данный момент времени, в декартовой системе координат.

**Задача 1.17.** Расположенная при  $z=0$  бесконечно тонкая по оси  $z$  и имеющая бесконечно большие размеры по осям  $x$  и  $y$  диэлектрическая пленка имеет поверхностный электрический заряд с плотностью  $\xi = 10 \text{ Кл/м}^2$ . Определите поле вектора электрической индукции, создаваемое данной пленкой в верхней и нижней полуплоскости.

**Задача 1.18.** На обкладке плоского конденсатора, расположенной при  $z \geq 0$  и имеющей бесконечную проводимость, равномерно распределен поверхностный электрический заряд с плотностью  $\xi = 10 \text{ Кл/м}^2$ . Определите поле вектора электрической индукции вблизи обкладки, при  $z < 0$ .

**Задача 1.19.** В однородной изотропной проводящей среде с параметрами  $\varepsilon = 4\varepsilon_0$ ,  $\mu = \mu_0$ ,  $\sigma = 10^{-9} \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$  отсутствуют свободные заряды, токи переноса и сторонние токи. Найдите общее уравнение, которому должна удовлетворять напряженность электрического поля.

**Задача 1.20.** Из уравнений Максвелла в дифференциальной форме и материальных уравнений для изотропной проводящей среды получите волновое уравнение для вектора электрической напряженности  $\vec{E}$ , считая свободные заряды и сторонние токи отсутствующими.

**Задача 1.21.** Плоская электромагнитная волна, распространяющаяся в среде с относительными проницаемостями  $\mu_r = 16$  и  $\varepsilon_r = 4$ , имеет амплитуду напряженности магнитного поля  $H_m = 10 \text{ А/м}$ . Определите амплитуду напряженности электрического поля для данной волны.

**Задача 1.22.** Световое излучение имеет длину волны  $500 \text{ нм}$ . Найдите волновое число данной волны при распространении в вакууме и в немагнитной среде с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_r = 16$ .

**Задача 1.23.** Плоская монохроматическая волна с длиной волны  $\lambda = 500 \text{ нм}$  и амплитудой  $E_{m1} = 10 \text{ В/м}$ , поляризованная в плоскости  $XZ$ ,

распространяется в немагнитной среде с коэффициентом преломления  $n = 2$ . Волновой вектор волны  $\vec{k}_1$  также лежит в плоскости  $XZ$  и составляет с осью  $+X$  угол  $\theta_1 = 30^\circ$ .

Запишите выражения для распределений электрического и магнитного полей в среде, используя комплексную форму записи.

**Задача 1.24.** Используя выражение для распределений электрического и магнитного полей, полученное в предыдущей задаче **23**, найдите среднее значение вектора Пойнтинга и интенсивность для рассматриваемой световой волны.

**Задача 1.25.** Для плоской электромагнитной волны с вектором напряженности электрического поля  $\vec{E}(z, t) = E_m \vec{j} \exp[i(\omega t - kz)]$ , распространяющейся в вакууме, найдите направление и среднее значение вектора Пойнтинга при  $E_m = 10$  В/м.

**Задача 1.26.** Плоская электромагнитная волна распространяется вдоль оси  $z$  и имеет в некоторый момент времени ориентацию вектора напряженности магнитного поля вдоль оси  $x$ . Нарисуйте взаимную ориентацию волнового вектора и остальных векторов в волне, в данный момент времени, в декартовой системе координат.

**Задача 1.27.** Гармоническая плоская волна с частотой  $\omega = 4\pi \cdot 10^{14}$  рад/с распространяется в немагнитной среде с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r = 2.25$  под углом  $\theta = 30^\circ$  к оси  $z$ , и ортогонально к оси  $x$ , вдоль которой она поляризована. Запишите математическое выражение для напряженности электрического поля данной волны; найдите значения ее длины волны и волнового числа в данной среде.

**Задача 1.28.** Для плоской электромагнитной волны с вектором напряженности электрического поля  $\vec{E}(x, t) = E_m \vec{j} \exp[i(\omega t - kx)]$ , распространяющейся в немагнитной среде с относительной проницаемостью  $\epsilon_r = 4$ , найдите амплитуду и направление вектора напряженности магнитного поля, а также направление и среднее значение вектора Пойнтинга при  $E_m = 10$  В/м.

**Задача 1.29.** Для электромагнитной волны, поляризованной по оси  $z$ , распространяющейся вдоль оси  $x$  в диэлектрической среде с

относительными проницаемостями  $\varepsilon_r = 4$  и  $\mu_r = 4$  и имеющей амплитуду напряженности электрического поля  $E_m = 10^{-2}$  В/м:

1) найти амплитуду и направление вектора напряженности магнитного поля;

2) найти амплитуду и направление вектора Пойнтинга.

Размерности найденных амплитуд выразить в системе СИ.

**Задача 1.30.** В однородной изотропной непроводящей среде отсутствуют свободные заряды и сторонние токи.

Используя систему уравнений Максвелла, выведите общее уравнение, которому должна удовлетворять напряженность магнитного поля.

**Задача 1.31.** Для среды, заданной в задаче 30, полагая, что магнитное поле зависит только от координаты  $x$ , получите скалярное одномерное волновое уравнение и запишите его общее решение.

**Задача 1.32.** Для плоской электромагнитной волны с вектором напряженности электрического поля  $\vec{E}(z, t) = E_m \vec{i} \exp[i(\omega t - kz)]$ , распространяющейся в вакууме, найдите направление и модуль вектора Пойнтинга при  $E_m = 100$  В/м.

**Задача 1.33.** Для световой волны, распространяющейся вдоль оси  $x$  в непроводящей среде с параметрами  $\varepsilon = 4\varepsilon_0$  и  $\mu = \mu_0$  и имеющей векторную амплитуду  $\vec{E}_m = \vec{j}E_m$ , где  $E_m = 10$  В/м, определите модуль и направление для векторной амплитуды напряженности магнитного поля.

**Задача 1.34.** Плоская монохроматическая электромагнитная волна, распространяющаяся вдоль оси  $z$ , имеет равные по амплитуде, но противофазные проекции вектора электрической напряженности на оси  $x$  и  $y$ . Определите поляризацию данной электромагнитной волны; ответ поясните.

**Задача 1.35.** Плоская монохроматическая электромагнитная волна, распространяющаяся вдоль оси  $z$ , имеет равные по амплитуде и сдвинутые по фазе на  $-\pi/2$  проекции вектора электрической напряженности на оси  $x$  и  $y$ . Определите вид поляризации данной волны; ответ поясните.

**Задача 1.36.** Плоская электромагнитная волна, распространяющаяся вдоль оси  $z$ , имеет такую же проекцию вектора напряженности светового поля на ось  $y$ , как и на ось  $x$ , и сдвинута относительно  $E_x$  по фазе на угол  $\varphi = 3\pi/4$ . Определите вид поляризации данной волны.

## Практическое занятие 2. Отражение и преломление плоских электромагнитных волн на плоской границе раздела

В результате решения задач студент приобретает:

- способность идентифицировать новые области исследований, новые проблемы в сфере профессиональной деятельности (ПК-9);
- готовность формулировать цели и задачи научных исследований (ПК-10).

### 2.1 Примеры решения задач по теме «Отражение и преломление плоских электромагнитных волн на плоской границе раздела»

**Задача 1.** Для плоской электромагнитной волны, распространяющейся в вакууме вдоль нормали к границе раздела с непроводящей средой, имеющей значения относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_r = 9$  и магнитной проницаемости  $\mu_r = 4$ , выведите выражения для коэффициента отражения от границы раздела и найдите его численное значение.

**Решение.** Будем полагать, что нормалью к границе раздела сред является ось  $y$ , и изобразим волновые векторы падающей ( $\vec{k}_i$ ), отраженной ( $\vec{k}_r$ ) и преломленной ( $\vec{k}_t$ ) волн на рисунке. Полагая все волны поляризованными по  $x$ , запишем выражения для их полей электрической напряженности:

$$\vec{E}_i(y, t) = \vec{E}_m \cos(\omega t - n_1 k_0 y), \quad (2.1)$$

$$\vec{E}_r(y, t) = \vec{E}_m \cos(\omega t + n_1 k_0 y), \quad (2.2)$$

$$\vec{E}_t(y, t) = \vec{E}_m \cos(\omega t - n_2 k_0 y), \quad (2.3)$$

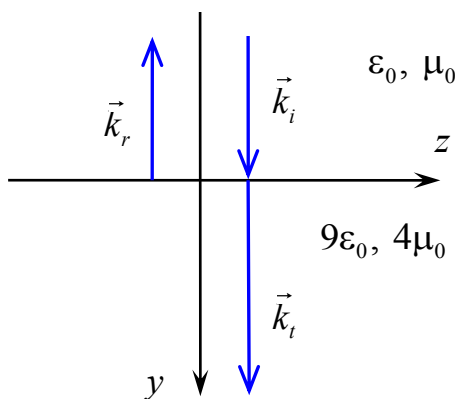


Рис.

где  $k_0 = \omega/c$ , а показатели преломления сред принимают значения  $n_1 = 1$  и  $n_2 = \sqrt{\epsilon_{r2}\mu_{r2}} = 6$ . Определяя далее направления векторов напряженности магнитного поля таким образом, чтобы  $\vec{E}$ ,  $\vec{H}$  и  $\vec{k}$  для каждой из волн образовывали правую тройку векторов, а также выражая модули векторов  $|\dot{I}_m|$

через  $|\dot{I}_m|$  и волновые сопротивления рассматриваемых сред  $W_1 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = W_0$  и  $W_2 = \sqrt{\mu_{r2}\mu_0/\epsilon_{r2}\epsilon_0} = (2/3)W_0$ ,

выражения для полей магнитной напряженности получаем в следующем виде:

$$H_{iz}(y,t) = -\frac{\dot{L}_{im}}{W_1} \exp[i(\omega t - n_1 k_0 y)], \quad (2.4)$$

$$H_{rz}(y,t) = \frac{\dot{L}_{rm}}{W_1} \exp[i(\omega t + n_1 k_0 y)], \quad (2.5)$$

$$H_{tz}(y,t) = -\frac{\dot{L}_{tm}}{W_1} \exp[i(\omega t - n_2 k_0 y)]. \quad (2.6)$$

Приравнявая далее в соответствие с граничными условиями составляющие соответствующих полей в средах 1 (суперпозиция падающей и отраженной волн) и 2 (преломленная волна) на их границе раздела  $y=0$  (в рассматриваемом случае все компоненты являются исключительно тангенциальными), получаем следующую систему алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} \dot{L}_{im} - \dot{L}_{rm} - \dot{L}_{tm}, \\ -\dot{L}_{im} - \dot{L}_{rm} - W_2 \dot{L}_{tm}. \end{cases} \quad (2.7)$$

Поскольку коэффициент отражения определяется через отношение  $R = \dot{L}_{rm} / \dot{L}_{im}$ , необходимо исключить из системы уравнений (2.7) амплитуду светового поля преломленной волны. Выполняя эту операцию, получаем:

$$-\dot{L}_{im} - \dot{L}_{rm} - W_2 (\dot{L}_{im} - \dot{L}_{rm}) = 0. \quad (2.8)$$

Поделив левую и правую части уравнения (2.8) на  $\dot{L}_{im}$ , после несложных преобразований находим:

$$R = \frac{\dot{L}_{rm}}{\dot{L}_{im}} = \frac{1 - W_1/W_2}{1 + W_1/W_2} = \frac{W_2 - W_1}{W_2 + W_1}. \quad (2.9)$$

В данном случае, при  $W_1 = W_0$  и  $W_2 = (2/3)W_0$  получаем, что коэффициент отражения принимает значение  $R = -0,2$ .

**Ответ:** 1. Коэффициент отражения от границы раздела выражается через волновые сопротивления сред:

$$R = \frac{1 - W_1/W_2}{1 + W_1/W_2} = \frac{W_2 - W_1}{W_2 + W_1}.$$

2. Численное значение коэффициента отражения  $R = -0,2$ .

## 2.2 Задачи для проработки темы

**Задача 2.1.** Для плоской электромагнитной волны, распространяющейся в непроводящей среде, имеющей значения

относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_r = 4$  и магнитной проницаемости  $\mu_r = 9$ , вдоль нормали к границе раздела с вакуумом, выведите выражения для коэффициента отражения от данной границы раздела и найдите его численное значение.

**Задача 2.2.** Для плоской электромагнитной волны, распространяющейся в непроводящей среде, имеющей значения относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_r = 16$  и магнитной проницаемости  $\mu_r = 4$ , вдоль нормали к плоской границе раздела с вакуумом, выведите выражения для коэффициента прохождения через границу раздела и найдите его численное значение.

**Задача 2.3.** Плоская световая волна с амплитудой  $E_{im} = 10$  В/м, поляризованная перпендикулярно к плоскости падения  $xu$ , распространяется в вакууме и имеет угол падения  $\theta_i = 30^\circ$  относительно нормали  $x$  к плоской границе раздела с немагнитной непроводящей средой, имеющей коэффициент преломления  $n = 2$ . Найдите: 1) угол преломления; 2) амплитуду напряженности электрического поля отраженной волны; 3) направление и амплитуду напряженности магнитного поля прошедшей волны.

**Задача 2.4.** Для плоской световой волны, поляризованной в плоскости падения и распространяющейся в немагнитной непроводящей среде с показателем преломления  $n = 2$ , найдите: 1) коэффициент отражения для нормального падения на плоскую границу с вакуумом; 2) угол падения, при котором коэффициент отражения от такой границы обращается в ноль; 3) область углов, при которых коэффициент отражения от этой границы по модулю равен единице.

**Задача 2.5.** Для плоской световой волны, поляризованной в плоскости падения и распространяющейся в немагнитной непроводящей среде с показателем преломления  $n = 1,5$ , найдите: 1) коэффициент отражения для нормального падения на плоскую границу с вакуумом; 2) угол падения, при котором коэффициент отражения от такой границы обращается в ноль; 3) область углов, при которых коэффициент отражения от этой границы по модулю равен единице.

**Задача 2.6.** Для плоской световой волны, распространяющейся в среде с показателем преломления  $n = 2$ , найдите область углов, при которых коэффициент отражения от её плоской границы с воздушной средой по модулю равен единице.

**Задача 2.7.** Найдите критический угол полного внутреннего отражения на границе раздела кварцевого стекла, имеющего показатель преломления  $n = 1,46$ , с воздушной средой.

### Практическое занятие 3. Интерференция света

В результате решения задач студент приобретает:

- способность идентифицировать новые области исследований, новые проблемы в сфере профессиональной деятельности (ПК-9);
- готовность формулировать цели и задачи научных исследований (ПК-10).

#### 3.1 Примеры решения задач по теме

**Задача 1.** Две плоские монохроматические волны 1 и 2 с длиной волны  $\lambda = 500$  нм и амплитудами  $E_{m1} = 10$  В/м и  $E_{m2} = 100$  В/м, поляризованные вдоль оси  $Z$ , распространяются в среде с показателем преломления  $n = 2$ . Волновые векторы волн  $\vec{k}_1$  и  $\vec{k}_2$  лежат в плоскости  $XU$  и составляют с осью  $+X$  углы  $\theta_1 = 10^\circ$  и  $\theta_2 = -10^\circ$ , соответственно.

Найдите распределение интенсивности в картине интерференции этих волн, определите период интерференционной картины и глубину модуляции интенсивности  $m = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$ .

**Решение.** Используя комплексную форму записи электрического поля световых волн, распространяющихся в произвольном направлении  $\vec{L}(\vec{r}, t) = E_m \exp[i(\omega t - \kappa \cdot \vec{r})]$ , запишем выражения для полей волн 1 и 2 с заданными ориентациями волновых векторов и вектора поляризации, как

$$\begin{aligned} \dot{L}_1(\vec{r}, t) &= E_{m1} \exp \left\{ i \left[ \omega t - \frac{2\pi}{\lambda} n (x \cos \theta + y \sin \theta) \right] \right\}, \\ \dot{L}_2(\vec{r}, t) &= E_{m2} \exp \left\{ i \left[ \omega t - \frac{2\pi}{\lambda} n (x \cos \theta - y \sin \theta) \right] \right\}, \end{aligned}$$

где введен угол  $\theta = \theta_1 = -\theta_2$ . Полное световое поле в среде является линейной суперпозицией полей этих волн:  $\dot{L}(\vec{r}, t) = \dot{L}_1(\vec{r}, t) + \dot{L}_2(\vec{r}, t)$ . Усредненная по периоду светового поля интенсивность определяется выражением  $I(\vec{r}) = |\dot{L}(\vec{r}, t)|^2 = \dot{L}(\vec{r}, t) \cdot \dot{L}^*(\vec{r}, t)$ , представляющим скалярное произведение комплексной векторной функции на её комплексно-сопряженную величину. Используя данные соотношения, находим распределение интенсивности:



$$I(\vec{r}) = \left( \dot{I}_{m_1} \left[ \left[ \frac{4\pi}{\lambda} n \sin \theta \right] y \right] + \dot{I}_{m_2} \left[ \left[ \frac{4\pi}{\lambda} n \sin \theta \right] y - y \sin \theta \right] \right)^2 + \left( \dot{I}_{m_1} \left[ \left[ \frac{4\pi}{\lambda} n \sin \theta \right] y \right] - \dot{I}_{m_2} \left[ \left[ \frac{4\pi}{\lambda} n \sin \theta \right] y - y \sin \theta \right] \right)^2 =$$

$$= |\dot{I}_{m_1}|^2 + |\dot{I}_{m_2}|^2 + 2 \dot{I}_{m_1} \dot{I}_{m_2} \cos \left[ \left( \frac{4\pi}{\lambda} n \sin \theta \right) y \right].$$

Учитывая действительный характер заданных амплитуд  $E_{m_1}$  и  $E_{m_2}$ , получаем следующее окончательное выражение для распределения интенсивности в интерференционной картине:

$$I(y) = E_{m_1}^2 + E_{m_2}^2 + 2E_{m_1}E_{m_2} \cos \left[ \left( \frac{4\pi}{\lambda} n \sin \theta \right) y \right] =$$

$$= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \left[ \frac{2\pi}{\Lambda} y \right],$$

где использованы обозначения  $I_{1,2} = |\dot{I}_{m_1, m_2}|^2$  – интенсивности интерферирующих волн 1 и 2 и  $\Lambda = \lambda / (2n \sin \theta)$  – пространственный период интерференционной картины.

С учетом условий задачи, получаем  $\Lambda = 720$  нм и  $m = 2\sqrt{I_1 I_2} / (I_1 + I_2) = 0,198$ .

**Ответ:** 1. Распределение интенсивности в интерференционной картине:

$$I(y) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \left[ \frac{2\pi}{\Lambda} y \right].$$

2. Пространственный период интерференционной картины  $\Lambda = 720$  нм.
3. Глубина модуляции интенсивности  $m = 0,198$ .

### 3.2 Задачи для проработки темы

**Задача 3.1.** Две плоские монохроматические волны 1 и 2 с длиной волны  $\lambda = 500$  нм и амплитудами  $E_{m_1} = 10$  В/м и  $E_{m_2} = 100$  В/м, поляризованные в плоскости  $XU$ , распространяются в немагнитной среде с коэффициентом преломления  $n = 2$ . Волновые векторы волн  $\vec{k}_1$  и  $\vec{k}_2$  также лежат в плоскости  $XU$  и составляют с осью  $+X$  углы  $\theta_1 = 15^\circ$  и  $\theta_2 = -15^\circ$ , соответственно.

Запишите выражения для распределений электрического и магнитного полей в среде, используя комплексную форму записи.

**Задача 3.2.** Используя выражение для распределения электрического поля, полученное в предыдущей задаче 1, найдите распределение интенсивности светового поля в среде и проведите его анализ, то есть

определите период интерференционной картины и глубину модуляции интенсивности и нарисуйте график, отражающий зависимость интенсивности от соответствующей пространственной координаты.

**Задача 3.3.** Плоская монохроматическая световая волна (длина волны  $\lambda = 500$  нм) падает из среды 1 (вакуум) нормально на плоскопараллельную стеклянную пластинку с коэффициентом преломления  $n = 1,5$  (среда 2), и распространяется далее тоже в вакууме (среда 3).

- 1) определите, в каких средах будет наблюдаться интерференция света;
- 2) найдите значения пространственного периода и контраста интерференционной картины в этих средах

**Задача 3.4.** Для интерферометра Юнга, изображенного на рисунке, выведите выражение для разности хода  $r'_2 - r'_1$  в параксиальном приближении.

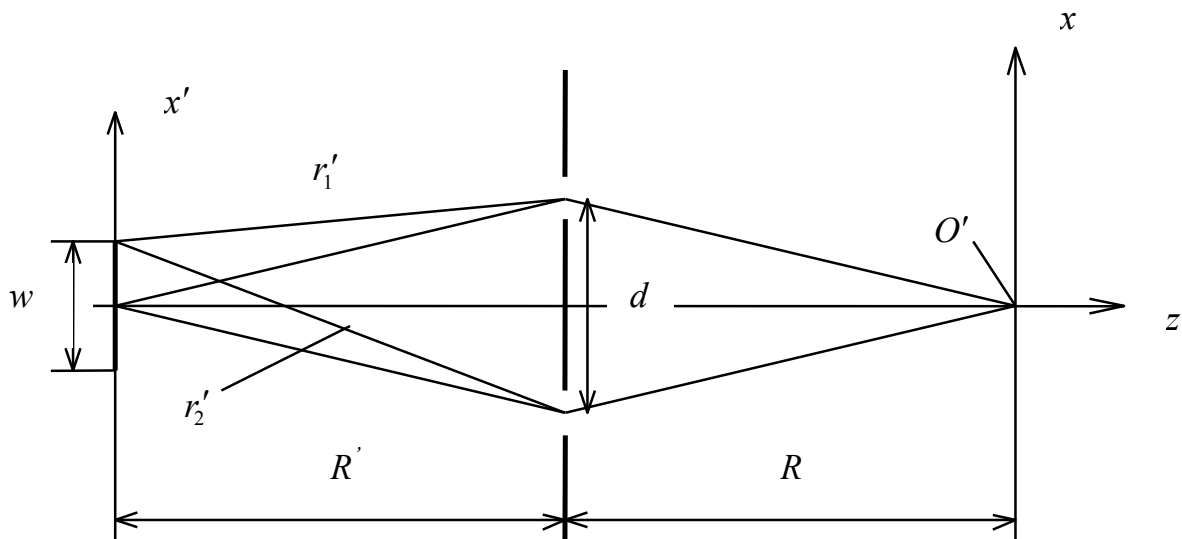


Рис.

**Задача 3.5.** Две плоские монохроматические световые волны 1 и 2 с длиной волны  $\lambda = 500$  нм и одинаковыми амплитудами  $E_{m1} = 100$  В/м и  $E_{m2} = 10$  В/м, поляризованные вдоль оси  $x$ , распространяются в немагнитной среде с коэффициентом преломления  $n = 1,5$  вдоль осей  $z$  и  $y$ , соответственно. Найдите распределение интенсивности света в картине интерференции этих волн.

**Задача 3.6.** Две плоские монохроматические световые волны 1 и 2 с длиной волны  $\lambda = 500$  нм и амплитудами  $E_{m1} = 10$  В/м и  $E_{m2} = 100$  В/м, поляризованные вдоль оси  $y$ , распространяются в немагнитной среде с коэффициентом преломления  $n = 2$  навстречу друг другу вдоль оси  $z$ . Найдите распределение интенсивности света в картине интерференции этих волн, ее пространственный период и контраст.

**Задача 3.7.** Лазер генерирует излучение с длиной волны  $\lambda = 750$  нм и с шириной спектра частот  $\delta f = 200$  МГц. Найдите для его излучения: степень монохроматичности; время когерентности; длину когерентности.

#### Практическое занятие 4. Дифракция света

В результате решения задач студент приобретает:

- способность идентифицировать новые области исследований, новые проблемы в сфере профессиональной деятельности (ПК-9);
- готовность формулировать цели и задачи научных исследований (ПК-10).

#### 4.1 Примеры решения задач по теме

**Задача 1.** Узкая щель шириной  $b = 40$  мкм освещается монохроматическим излучением с плоским волновым фронтом (см. рис.) и длиной волны  $\lambda = 750$  нм. На экране  $P$ , помещенном в фокальной плоскости линзы  $Ls$ , наблюдается дифракция Фраунгофера с характерным размером  $a$ . Определите данный размер  $a$ , если расстояние от линзы до экрана  $f = 60$  см.

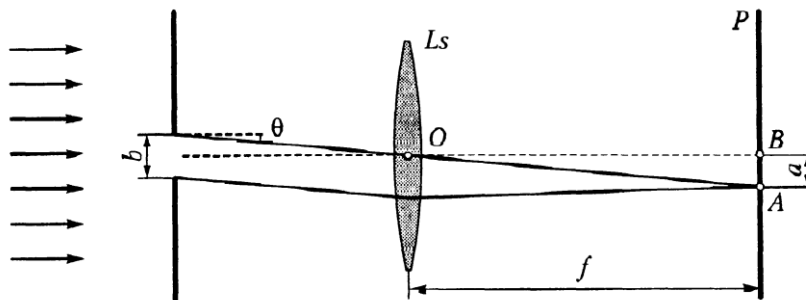


Рисунок 4.1

**Решение.** При дифракции на щели на экране образуется система дифракционных максимумов и минимумов. Условие минимума порядка  $m$  имеет вид  $b \sin \theta = m\lambda$ . Из треугольника  $OAB$ , с учетом малости углов дифракции ( $\lambda/b \ll 1$ ), с использованием условия первого минимума, получаем

$$\operatorname{tg} \theta \approx \sin \theta = \frac{a}{f} = \frac{\lambda}{b}.$$

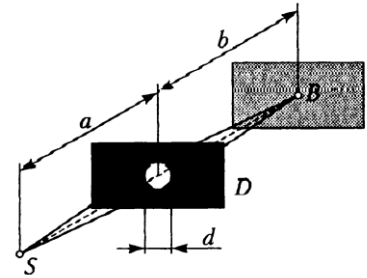
Отсюда находим, что  $a = f\lambda/b = 11,25$  мм.

**Ответ:**  $a = 11,25$  мм.

## 4.2 Задачи для проработки темы

**Задача 4.1.** На чертеже зон Френеля, сделанном для плоского фазового фронта волны, радиус первой окружности, ограничивающей центральную зону, равен 20 мм. Радиус последней окружности составляет 140 мм. Сколько зон Френеля содержится на чертеже? Зная, что площади всех зон одинаковы по величине, определите расстояние между последними окружностями (ширину последней изображенной зоны).

**Задача 4.2.** Плоская монохроматическая волна с интенсивностью  $I_0$  падает по нормали на круглое отверстие с радиусом  $r = 1,2$  мм (см. рис.). Расстояние  $a$  велико; длина волны составляет  $\lambda = 640$  нм. Найдите интенсивность в точке  $B$  при  $b = 1,5$  м.



**Задача 4.3.** На рисунке представлен график распределения интенсивности света в случае дифракции Фраунгофера на щели, где  $a$  – характерный размер на экране. Как изменится вид графика, если ширину щели уменьшить в два раза?

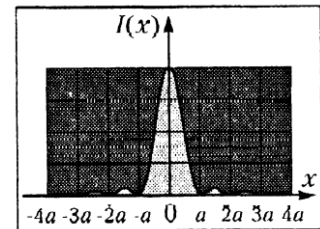


Рис.

**Задача 4.4.** Как изменится дифракционная картина главных максимумов, если у амплитудной решетки  $G$  (см. рис.) с периодом 6 мкм увеличить ширину щелей до 2 мкм? Исходную ширину щели считать бесконечно малой.

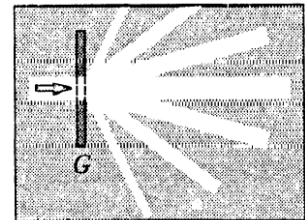


Рис.

**Задача 4.5.** Дифракционная решетка шириной 25 мм имеет 400 шт/мм. Определите: а) её разрешающую способность для спектра третьего порядка; б) наименьшую разность длин волн  $\delta\lambda$  двух спектральных линий одинаковой интенсивности вблизи  $\lambda = 560$  нм, которые можно разрешить такой решеткой в максимальном порядке спектра, если свет падает на решетку нормально.

**Задача 4.6.** Какое фокусное расстояние должен иметь объектив  $Ls$  спектрографа с дифракционной решеткой, имеющей ширину заштрихованной части 100 мм и полное число штрихов 60 000, чтобы разрешаемые им во втором порядке спектральные линии были видны на фотопластинке не ближе чем на расстоянии 0,2 мм, при  $\lambda = 650$  нм?

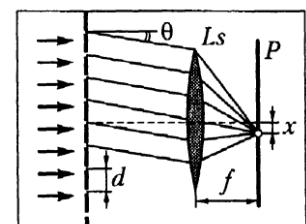


Рис.

## Практическое занятие 5. Оптика анизотропных сред

В результате решения задач студент приобретает:

- способность идентифицировать новые области исследований, новые проблемы в сфере профессиональной деятельности (ПК-9);
- готовность формулировать цели и задачи научных исследований (ПК-10).

### 5.1 Примеры решения задач по теме

**Задача 1.** Для световой волны, распространяющейся вдоль оси  $y$  в кубическом кристалле симметрии  $23$ , найдите все компоненты тензора диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_{ik}(\omega, \vec{k})$ , в отсутствие оптического поглощения.

Примите во внимание, что в кристалле данной симметрии:

- 1)  $\varepsilon_{ik}(\omega, 0) = \varepsilon_0 n_0^2 \delta_{ik}$ , где  $n_0(\omega)$  - его показатель преломления;
- 2) псевдотензор, характеризующий пространственную дисперсию, определяется выражением  $g_{ml} = g_0 \delta_{ml}$  ( $g_0 = 2n_0 \rho / k_0$ ,  $\rho$  - удельное оптическое вращение).

**Решение.** Для нахождения тензора  $\varepsilon_{ik}(\omega, \vec{k})$  с учетом пространственной дисперсии воспользуемся соотношением

$$\varepsilon_{ij}^r = \frac{\varepsilon_{ij}^{(0)}}{\varepsilon_0} - i \frac{\sigma_{ij}}{\varepsilon_0 \omega} - i \delta_{ijk} g_{kl} m_l,$$

где в соответствии с условиями задачи полагаем:  $\sigma_{ij} = 0$ ,  $m_1 = 0$ ,  $m_2 = 1$  и  $m_3 = 0$ . Придавая индексам  $i$  и  $j$  значения от 1 до 3, в результате получаем

$$\varepsilon_{11}^r = n_0^2 \delta_{11} - i \delta_{11k} g_{k2} m_2 = n_0^2, \quad \varepsilon_{22}^r = n_0^2, \quad \varepsilon_{33}^r = n_0^2,$$

$$\varepsilon_{12}^r = n_0^2 \delta_{12} - i \delta_{123} g_{32} m_2 = -i \delta_{123} g_0 \delta_{32} m_2 = 0, \quad \varepsilon_{21}^r = 0,$$

$$\varepsilon_{13}^r = n_0^2 \delta_{13} - i \delta_{132} g_{22} m_2 = -i \delta_{132} g_0 \delta_{22} m_2 = i g_0 = i \frac{2n_0 \rho}{k_0}, \quad \varepsilon_{31}^r = -i g_0 = -i \frac{2n_0 \rho}{k_0},$$

$$\varepsilon_{23}^r = n_0^2 \delta_{23} - i \delta_{231} g_{12} m_2 = 0, \quad \varepsilon_{32}^r = 0.$$

**Ответ:**

$$\varepsilon(\omega, \vec{k}) = \begin{vmatrix} 0 & -ig_0 & 0 \\ 0 & n_0^2 & 0 \\ ig_0 & 0 & n_0^2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} n_0^2 & 0 & -i2n_0\rho/k_0 \\ 0 & n_0^2 & 0 \\ i2n_0\rho/k_0 & 0 & n_0^2 \end{vmatrix}.$$

**Задача 2.** Используя полученный в предыдущей задаче тензор диэлектрической проницаемости, найдите систему алгебраических уравнений для компонент вектора поляризации  $e_j$  плоской световой

волны, распространяющейся в кубическом кристалле симметрии 23 вдоль оси  $y$ .

**Решение.** Для решения воспользуемся общим уравнением в следующем виде:

$$\left[ n^2 (\delta_{ij} - m_i m_j) - \varepsilon_{ij}^r \right] e_j = 0.$$

Из него для  $i = 1$  получаем первое уравнение: учитывая, что  $m_1 = 0$ ,  $m_2 = 1$  и  $m_3 = 0$ :

$$\left[ n^2 (\delta_{11} - m_1 m_1) - \varepsilon_{11}^r \right] e_1 + \left[ n^2 (\delta_{12} - m_1 m_2) - \varepsilon_{12}^r \right] e_2 + \left[ n^2 (\delta_{13} - m_1 m_3) - \varepsilon_{13}^r \right] e_3 = 0.$$

Учитывая, что  $m_1 = 0$ ,  $m_2 = 1$  и  $m_3 = 0$ , а также используя значения компонент найденного в предыдущей задаче тензора, отсюда находим первое уравнение из системы:

$$(n^2 - n_0^2) e_1 + i g_0 e_3 = 0.$$

Для  $i = 2$  получаем второе уравнение:

$$(n^2 - n_0^2) e_2 = 0,$$

и для  $i = 3$  – третье:

$$-i g_0 e_1 + (n^2 - n_0^2) e_3 = 0.$$

**Ответ:** Система алгебраических уравнений для компонент вектора поляризации  $e_j$  плоской световой волны, распространяющейся в кубическом кристалле симметрии 23 вдоль оси  $y$ :

$$\begin{cases} (n^2 - n_0^2) e_1 + i g_0 e_3 = 0, \\ (n^2 - n_0^2) e_2 = 0, \\ -i g_0 e_1 + (n^2 - n_0^2) e_3 = 0. \end{cases}$$

## 5.2 Задачи для проработки темы

**Задача 5.1.** Вектор напряженности электрического поля в одноосном кристалле задан в виде  $\vec{E} = 10 \left( \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{k^v}{\sqrt{2}} \right)$  В/м, а компоненты тензора диэлектрической проницаемости равны  $\varepsilon_{\perp} = 4\varepsilon_0$  и  $\varepsilon_{\parallel} = \varepsilon_0$ .

Определите: 1) Вектор электрической индукции  $\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$  данного поля; 2) вектор электрической поляризации среды  $\vec{P} = \varepsilon_0 \chi \cdot \vec{E}$ , наводимой данным полем; 3) тензор диэлектрической восприимчивости  $\chi$ ; 4) угол между векторами электрической напряженности и электрической индукции.

**Задача 5.2.** Из уравнений Максвелла и материальных уравнений для проводящей немагнитной анизотропной среды, в которой отсутствуют свободные заряды и сторонние токи, получить волновое уравнение для вектора напряженности электрического поля.

**Задача 5.3.** Используя полученное в предыдущей задаче 5.1 волновое уравнение и решение в виде плоской электромагнитной волны

$$\vec{E}(z,t) = \vec{E}^{\text{inc}} \exp[i(\omega t - kz)],$$

распространяющейся в одноосном кристалле, найдите аналитическое выражение для волнового числа  $k$ .

**Задача 5.4.** Для световой волны, распространяющейся вдоль оси  $x$  в кубическом кристалле симметрии 23, найдите все компоненты тензора диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_{ik}(\omega, \vec{k})$ , в отсутствие оптического поглощения.

Примите во внимание, что в кристалле данной симметрии:

- 1)  $\varepsilon_{ik}(\omega, 0) = \varepsilon_0 n_0^2 \delta_{ik}$ , где  $n_0(\omega)$  - его показатель преломления;
- 2) псевдотензор, характеризующий пространственную дисперсию, определяется выражением  $g_{ml} = g_0 \delta_{ml}$  ( $g_0 = 2n_0 \rho / k_0$ ,  $\rho$  - удельное оптическое вращение).

**Задача 5.5.** Используя полученный в предыдущей задаче тензор диэлектрической проницаемости, найдите систему алгебраических уравнений для компонент вектора поляризации  $e_j$  плоской световой волны, распространяющейся в кубическом кристалле симметрии 23 вдоль оси  $x$ .

**Задача 5.6.** Найдите систему алгебраических уравнений для компонент вектора поляризации  $e_j$  плоской световой волны, распространяющейся в одноосном кристалле вдоль оси  $y$ , не обладающем пространственной дисперсией и в отсутствие оптического поглощения. Компоненты тензора относительной диэлектрической проницаемости примите равными  $\varepsilon_{\perp} = \varepsilon_0 n_0^2$  и  $\varepsilon_{\parallel} = \varepsilon_0 n_e^2$ , где  $n_0$  и  $n_e$  - обыкновенный и необыкновенный показатели преломления кристалла, соответственно.

**Задача 5.7.** Используя полученную при решении задачи 5.5 систему алгебраических уравнений для компонент вектора поляризации  $e_j$  плоской световой волны, распространяющейся в кубическом кристалле симметрии 23 вдоль оси  $x$ , найдите соответствующие данному направлению распространения собственные волны.

**Задача 5.8.** Плоская монохроматическая световая волна с длиной волны 633 нм, распространяющаяся в кристалле симметрии 23 с показателем преломления  $n_o = 2,58$  и удельным оптическим вращением  $\rho = 6,0^0/\text{мм}$  вдоль оси  $x$ , на входной грани, при  $x = 0$ , имеет векторную амплитуду  $\vec{E}^{(m0)} = E^{(m0)}(\vec{y} + \vec{z})/\sqrt{2}$ .

Найдите векторную амплитуду волны при  $x = 7,5$  мм, на выходной грани кристалла.

**Задача 5.9.** Плоская монохроматическая световая волна с длиной волны 633 нм в одноосном кристалле, имеющем компоненты тензора относительной диэлектрической проницаемости, равные  $\varepsilon_{\perp} = n_o^2$  и  $\varepsilon_{\parallel} = n_e^2$ , где  $n_e = 2,202$  и  $n_o = 2,2868$  - обыкновенный и необыкновенный показатели преломления, соответственно, имеет единичный вектор волновой нормали, ориентированный в плоскости  $yz$  под углом  $45^0$  к оптической оси  $z$ .

Найдите показатели преломления и единичные векторы поляризации собственных волн, лучевой вектор и угол между данным вектором и вектором волновой нормали.

**Задача 5.10.** Плоская монохроматическая световая волна с длиной волны 628 нм падает нормально на пластинку из кристаллического кварца ( $n_o = 1,54282$ ;  $n_e = 1,55188$ ), имеющую толщину  $d = 17,3$  мкм и вырезанную перпендикулярно оси  $x$ . Найдите поляризацию излучения на выходе пластинки, если на входной грани она является линейной, с ориентацией вектора поляризации под углом  $45^0$  к оптической оси  $z$ .

**Задача 5.11.** Кристалл титаната висмута (класс симметрии 23), имеющий показатель преломления  $n_o = 2,58$  и электрооптический коэффициент  $r_{41} = 5$  пм/В на длине волны 633 нм, толщиной 3 мм вдоль кристаллографического направления  $[110]$ , помещен в плоский конденсатор.

Найдите компоненты тензора диэлектрической непроницаемости данного образца в отсутствие приложенного напряжения и для напряжения на конденсаторе  $U = 3$  кВ, принимая во внимание только электрооптический эффект.

**Задача 5.12.** Используя условия предыдущей задачи 5.11, найдите возмущения компонент тензора относительной диэлектрической проницаемости кристалла титаната висмута, наведенные приложенным электрическим полем.



**Задача 5.13.** К кристаллу ниобата лития приложено электрическое поле с напряженностью 50 кВ/см вдоль оси  $y$ . Используя значения показателей преломления  $n_o=2,2868$ ,  $n_e=2,202$  и электрооптических коэффициентов  $r_{22}=3,4 \cdot 10^{-12}$  м/В,  $r_{13}=8,6 \cdot 10^{-12}$  м/В,  $r_{33}=30,8 \cdot 10^{-12}$  м/В,  $r_{51}=28 \cdot 10^{-12}$  м/В на длине волны 633 нм, найдите возмущения компонент тензора относительной диэлектрической проницаемости.

**Задача 5.14.** В кристалле титаната висмута (класс симметрии 23) среза (100), имеющем показатель преломления  $n_o=2,58$  и электрооптический коэффициент  $r_{41}=5$  пм/В на длине волны 633 нм, сформирована отражательная фоторефрактивная решетка с распределением электрического поля

$$\vec{E}^v(x) = \vec{x} E \cos(Kx),$$

пространственным периодом  $\Lambda = 123$  нм и амплитудой  $E^{m0} = 2$  кВ/см.

Найдите волновое число  $K$  решетки и все компоненты тензора диэлектрической проницаемости данного кристалла, принимая во внимание линейный электрооптический эффект.

### Рекомендуемая литература

1. Шандаров В.М. Основы физической и квантовой оптики: учеб. пособие / В.М. Шандаров; Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012. – 197 с., <http://edu.tusur.ru/training/publications/750>
2. Волновая оптика : Учебное пособие для вузов / Н. И. Калитеевский. - 4-е изд., стереотип. - СПб. : Лань, 2006. – 465 с.
3. Шандаров С.М. Введение в оптическую физику : учебное пособие для студентов направлений подготовки «Фотоника и оптоинформатика», «Электроника и наноэлектроника», «Электроника и микроэлектроника» / С.М. Шандаров. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012. – 127 с., <http://edu.tusur.ru/training/publications/2196>
4. Шандаров С.М. Введение в нелинейную оптику : учебное пособие для студентов направлений подготовки «Фотоника и оптоинформатика», «Электроника и наноэлектроника», «Электроника и микроэлектроника» / С.М. Шандаров. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012. – 41 с., <http://edu.tusur.ru/training/publications/2059>
5. Информационная оптика / Под ред. Н.Н. Евтихеева. Учебное пособие – М., Издательство МЭИ, 2000. - 516 с.
6. Стафеев С.К., Боярский К.К., Башнина Г.Л. Основы оптики: Учебное пособие. – СПб.: Питер, 2006. – 336 с.

7. Пихтин А.Н. Оптическая и квантовая электроника. Учебник для ВУЗов.- М.: Высшая школа, 2001. – 574 с.
8. Дубнищев Ю.Н. Колебания и волны: Учеб. пособие. – СПб.: Лань, 2011., [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_cid=25&pl1\\_id=683](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=683)
9. Розеншер Э. Оптоэлектроника : Пер. с фр. / Э. Розеншер, Б. Винтер ; ред. пер. О. Н. Ермаков. - М. : Техносфера, 2006. - 588 с. Фоторефрактивные эффекты в электрооптических кристаллах : монография / С.М. Шандаров, В.М. Шандаров, А.Е. Мандель, Н.И. Буримов. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012. – 242 с., <http://edu.tusur.ru/training/publications/1553>
10. Теоретическая физика : учебное пособие для вузов: В 10 т. : Т. 8 : Электродинамика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц ; ред. : Л. П. Питаевский. - 4-е изд., стереотип. - М. : Физматлит, 2005. - 651 с.
11. Ярив А. Оптические волны в кристаллах / А. Ярив, П. Юх. – М.: Мир, 1987. – 616 с.
12. Звелто О. Принципы лазеров / О. Звелто. – СП-б. : Лань, 2008. – 720 с.
13. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. - М.: Наука, 1970. – 855 с.
14. Никоноров Н.В., Шандаров С.М. Волноводная фотоника: Учебное пособие. – СПб.: Издательство СПбГУ ИТМО, 2008 – 142 с.
15. Ахманов С.А., Никитин С.Ю. Физическая оптика. – М.: Изд-во МГУ, 1998. – 626 с.
16. Франсон М. Оптика спеклов: Пер. с англ. – М.: Мир, 1980. – 171 с.
17. Теория когерентных изображений / П.А. Бакут, В.И. Мандросов, И.Н. Матвеев и др.; Под ред. Н.Д. Устинова. – М.: Радио и связь, 1987. – 264 с.
18. Кившарь Ю.С., Агравал Г.П. Оптические солитоны: От волоконных световодов до фотонных кристаллов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 648 с.
19. Дмитриев В.Г. Нелинейная оптика и обращение волнового фронта. – М: Физматлит, 2003. – 256 с.
20. Стрелков С.П. Введение в теорию колебаний. – М.: Наука, 1964. – 440 с.
21. Матвеев А.Н. Оптика: Учеб. пособие для физ. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1985. – 351 с.
22. Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн. – М.: Наука, 1992. – 454 с.
23. Введение в интегральную оптику / Под ред. М. Барноски; пер. с англ. под ред. Т.А. Шмаонова. – М.: Мир, 1977. – 367 с.
24. Прикладная физическая оптика: Учебник для вузов/И.М. Нагибина, В.А. Москалев, Н.А. Полушкина, В.Л. Рудин. - М.: Высш. шк., 2002.
25. Шен И.Р. Принципы нелинейной оптики. – М.: Мир, 1989. – 557 с.

Учебное пособие

Шандаров С.М.

Оптическая физика

Методические указания к практическим занятиям

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