

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

Кафедра электронных приборов

ПРАКТИКУМ ПО КВАНТОВОЙ И НЕЛИНЕЙНОЙ ОПТИКЕ

Методические указания к практическим занятиям
для студентов направления 12.03.03 «Фотоника и оптоинформатика»

Шандаров, Станислав Михайлович
Акрестина, Анна Сергеевна

Практикум по квантовой и нелинейной оптике: методические указания к практическим занятиям для студентов направления 12.03.03 «Фотоника и оптоинформатика» / С.М. Шандаров, А.С. Акрестина; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра электронных приборов. – Томск : ТУСУР, 2018. – 12 с.

Целью настоящей работы является подготовка студентов к математическому моделированию процессов и объектов фотоники и оптоинформатики, их исследованию на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и самостоятельно разработанных программных продуктов.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению «Фотоника и оптоинформатика» по дисциплине «Практикум по квантовой и нелинейной оптике».

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

Кафедра электронных приборов

УТВЕРЖДАЮ
Зав. кафедрой ЭП
_____ С.М. Шандаров
«___» _____ 2018 г.

ПРАКТИКУМ ПО КВАНТОВОЙ И НЕЛИНЕЙНОЙ ОПТИКЕ

Методические указания к практическим занятиям
для студентов направления 12.03.03 «Фотоника и оптоинформатика»

Разработчики

д-р. физ.-мат. наук,
проф. каф. ЭП
_____ С.М. Шандаров
«___» _____ 2018 г.

канд. физ.-мат. наук,
ст. преподаватель каф. ЭП
_____ А.С. Акрестина
«___» _____ 2018 г.

Содержание

1 Введение.....	5
2 Задачи	5
2.1 Примеры решения задач.....	5
2.2 Задачи для проработки.....	6
3 Вопросы для подготовки к контрольной работе.....	9
Список литературы	11

1 Введение

Целью занятий является обучение студентов математическому моделированию процессов и объектов фотоники и оптоинформатики, их исследованию на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и самостоятельно разработанных программных продуктов.

2 Задачи

2.1 Примеры решения задач

Задача. 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 $\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_m \exp[i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})]$, запишем выражения для полей волн 1 и 2 с заданными ориентациями волновых векторов и вектора поляризации, как

$$\vec{E}_1(\vec{r}, t) = E_{m1} \vec{k}^0 \exp\left\{i\left[\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} n(x \cos \theta + y \sin \theta)\right]\right\},$$

$$\vec{E}_2(\vec{r}, t) = E_{m2} \vec{k}^0 \exp\left\{i\left[\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} n(x \cos \theta - y \sin \theta)\right]\right\},$$

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

$$\begin{aligned}
I(\vec{r}) &= \left(\dot{E}_{m1} \vec{k}^0 \exp \left\{ i \left[\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} n (x \cos \theta + y \sin \theta) \right] \right\} + \dot{E}_{m2} \vec{k}^0 \exp \left\{ i \left[\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} n (x \cos \theta - y \sin \theta) \right] \right\} \right) \cdot \\
&\cdot \left(\dot{E}_{m1}^* \vec{k}^0 \exp \left\{ -i \left[\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} n (x \cos \theta + y \sin \theta) \right] \right\} + \dot{E}_{m2}^* \vec{k}^0 \exp \left\{ -i \left[\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} n (x \cos \theta - y \sin \theta) \right] \right\} \right) = \\
&= |\dot{E}_{m1}|^2 + |\dot{E}_{m2}|^2 + \dot{E}_{m1} \dot{E}_{m2}^* \exp \left[-i \frac{4\pi}{\lambda} n y \sin \theta \right] + \dot{E}_{m2} \dot{E}_{m1}^* \exp \left[i \frac{4\pi}{\lambda} n y \sin \theta \right].
\end{aligned}$$

Учитывая действительный характер заданных амплитуд E_{m1} и E_{m2} , получаем следующее окончательное выражение для распределения интенсивности в интерференционной картине:

$$\begin{aligned}
I(y) &= E_{m1}^2 + E_{m2}^2 + 2E_{m1}E_{m2} \cos \left[\left(\frac{4\pi}{\lambda} n \sin \theta \right) y \right] = \\
&= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda} y \right],
\end{aligned}$$

где использованы обозначения $I_{1,2} = |\dot{E}_{m1,m2}|^2 = E_{m1,m2}^2$ – 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 $m = 0,198$.

2.2 Задачи для проработки

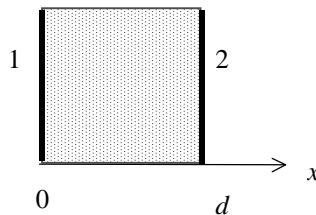
1. Заряженная частица с массой $m = 1 \cdot 10^{-26}$ кг совершает гармонические колебания вдоль оси x относительно положения равновесия $x = x_0$ и характеризуется потенциальной энергией $U(x) = b(x - x_0)^2$, где $b = 2\pi^2$ Дж/м².
 - a. Вычислите частоту колебаний частицы в Гц, соответствующую длину волны электромагнитного излучения и его волновое число.
 - b. Постройте временную зависимость отклонения частицы от положения равновесия $x(t)$ для начальных условий $x(0) = x_0$ и $x(T/4) = x_0 + 1 \times 10^{-13}$ м, где T – период гармонических колебаний, при $x_0 = 3 \cdot 10^{-10}$ м, с использованием пакета OpenOffice Calc.

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

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

постройте фазовую траекторию с использованием пакета OpenOffice Calc.

3. Проводящий диэлектрик, изображенный на рисунке, заключен между обкладками плоского конденсатора, отключенного от внешних источников, и имеющего поперечные размеры обкладок, многократно превышающие расстояние d между ними. В момент времени $t = 0$ разность потенциалов на обкладках 1 и 2 имела значение U_0 .



- a. Используя условие непрерывности линий полного тока, найдите общее решение для зависимости напряженности электрического поля в диэлектрике от времени.
- b. Постройте с использованием пакета OpenOffice Calc временные зависимости для напряженности электрического поля в диэлектрике при $t \geq 0$, для следующих параметров диэлектрического слоя и значений начальной разности потенциалов:
- а) $d = 1$ мм, $\varepsilon = 30\varepsilon_0$, $\sigma = 10^{-9}$ Ом $^{-1}$ м $^{-1}$, $U_0 = 100$ В;
- б) $d = 0,2$ мм, $\varepsilon = 200\varepsilon_0$, $\sigma = 10^{-6}$ Ом $^{-1}$ м $^{-1}$, $U_0 = 1$ В.
4. 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 $\xi = 10$ Кл/м 2 .
- a. Определите поле вектора электрической индукции, создаваемое данной пленкой в верхней и нижней полуплоскости.
- b. Нарисуйте (постройте) картину создаваемого однородно заряженной пленкой распределения вектора электрической напряженности в пространстве вблизи нее, по координатам x и y .
5. Плоская электромагнитная волна с вектором напряженности электрического поля $\vec{E}(z,t) = E_m \vec{j} \cos(\omega t - kz)$ и с длиной волны $\lambda = 500$ нм распространяется в вакууме.

- a. Найдите выражение для напряженности магнитного поля данной волны.
 - b. Нарисуйте картину распределения в пространстве, для $0 \leq z \leq \lambda$, вектора напряженности электрического поля, при $E_m = 10$ В/м и $t = 0$.
 - c. Нарисуйте картину распределения во времени, для $0 \leq t \leq 2\pi / \omega$, вектора напряженности магнитного поля, при $E_m = 10$ В/м и $z = \lambda / 4$.
6. Плоская электромагнитная волна, распространяющаяся вдоль оси z , имеет проекции вектора напряженности светового поля на оси y и x , равные соответственно $E_y = 10$ В/м и $E_x = 8$ В/м. При этом сдвиг по фазе для составляющей E_y относительно E_x имеет значение $\varphi = 3\pi/4$.
- a. Определите вид поляризации данной волны.
 - b. Нарисуйте картину эволюции вектора напряженности электрического поля $\vec{E}(0, t)$ для интервала времени $0 \leq t \leq 2\pi / \omega$, наблюдаемую при $z = 0$.
7. Для плоской световой волны, поляризованной в плоскости падения и распространяющейся в воздухе, найдите:
- a. Зависимость коэффициента отражения от угла падения на границу раздела с оптическим стеклом, имеющим значения показателя преломления $n = 1,51$.
 - b. Зависимость интенсивности отраженной волны от угла падения, $I_r(\theta_i)$, для рассмотренного выше случая, при интенсивности падающей волны $I_i = 100$ мВт/см².
 - c. Постройте с использованием пакета OpenOffice Calc данные зависимости от угла падения θ_i для: а) модуля коэффициента отражения; б) фазы коэффициента отражения; в) интенсивности $I_r(\theta_i)$.
8. Плоскопараллельный световой пучок с апертурой $D = 4$ мм, поляризованный перпендикулярно плоскости падения, падает на границу плоскопараллельной кварцевой пластины с показателем преломления $n = 1,51$ и с толщиной $h = 20$ мм под углом $\theta_i = 30^\circ$ из воздуха. Изобразите траекторию пучка в масштабе 2:1 до пластины, внутри нее, и после нее. Найдите:
- a. Интенсивность прошедшего пучка при входной интенсивности $I_i = 1$ Вт/см².
 - b. Поперечное смещение пучка, вызванное его прохождением через плоскопараллельную пластину.

9. Две плоские монохроматические волны 1 и 2 с длиной волны $\lambda = 405$ нм и амплитудами $E_{m1} = 10$ В/м и $E_{m2} = 100$ В/м, поляризованные в плоскости XU , распространяются в немагнитной среде с коэффициентом преломления $n = 1,46$. Волновые векторы волн \vec{k}_1 и \vec{k}_2 ориентированы в плоскости XU и составляют с осью $+X$ углы $\theta_1 = 5^\circ$ и $\theta_2 = -5^\circ$, соответственно.
- Запишите выражения для распределений электрического поля в среде, используя комплексную форму записи.
 - Найдите распределение интенсивности светового поля в среде и проведите его анализ:
 - Определите направление волнового вектора \vec{K} интерференционной картины, её контраст и пространственный период;
 - Нарисуйте световые пучки, создающие интерференционную картину, дополнив её диаграммой волновых векторов \vec{k}_1 , \vec{k}_2 и вектора \vec{K} ;
 - Постройте с использованием пакета OpenOffice Calc зависимость интенсивности света в интерференционной картине от соответствующей координаты.

3 Вопросы для подготовки к контрольной работе

- Как можно описать математически гармоническое колебание? Какими параметрами характеризуется гармоническое колебание?
- Нарисуйте график зависимости потенциальной энергии системы, в которой могут происходить механические колебания вблизи положения равновесия, от координаты. Запишите математическое выражение для этой зависимости при малых отклонениях от положения равновесия.
- Запишите дифференциальное уравнение, описывающее одномерный линейный осциллятор. Каково его общее решение?
- Какой временной зависимостью описываются свободные колебания заряда в последовательном колебательном контуре? Изобразите график данной зависимости.
- Дайте определения понятиям «фазовая плоскость», «изображающая точка», «фазовая траектория». Поясните ответ рисунком.
- Как можно получить уравнение фазовых траекторий для свободных колебаний в системе с одной степенью свободы?
- Нарисуйте фазовый портрет гармонических колебаний и дайте ему физическую трактовку.
- Запишите математическое выражение для напряженности электрического поля плоской электромагнитной волны,

- распространяющейся в произвольном направлении. Поясните все обозначения.
9. Какое поле называют поляризованным, а какое неполяризованным?
 10. Чем отличаются волны с линейной, эллиптической и круговой (левой и правой) поляризациями?
 11. Как вводится коэффициент отражения и коэффициент прохождения света для плоских монохроматических волн?
 12. Запишите формулы Френеля для поляризации, нормальной к плоскости падения, и поясните все обозначения.
 13. Запишите формулы Френеля для волн, поляризованных в плоскости падения, и поясните все обозначения.
 14. Какие явления характеризуют модуль и фаза коэффициента отражения?
 15. Нарисуйте примерный вид зависимости модуля коэффициента отражения от угла падения для волн, поляризованных нормально к плоскости падения.
 16. Нарисуйте примерный вид зависимости модуля коэффициента отражения от угла падения для волн, поляризованных в плоскости падения. Как называется угол падения, при котором модуль коэффициента отражения обращается в ноль?
 17. Как можно найти интенсивность светового поля, создаваемого несколькими источниками света, в виде суммы аддитивного и интерференционного членов?
 18. Что представляет собой интерференционная картина? Как она может быть реализована?
 19. Опишите подход, позволяющий найти распределение интенсивности света в картине интерференции двух плоских монохроматических световых волн одинаковой частоты.
 20. Поясните понятие «контраст интерференционной картины» на примере распределения интенсивности при интерференции двух плоских монохроматических световых волн одинаковой частоты.

Список литературы

1. Введение в оптическую физику : учебное пособие для студентов направления подготовки 12.03.03 «Фотоника и оптоинформатика» / С.М. Шандаров. – Томск: ТУСУР, 2018. – 127 с. — Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/7307>
2. Теоретические основы электротехники. Часть 1. Установившиеся режимы в линейных электрических цепях: Учебное пособие [Электронный ресурс] / Шандарова Е. Б. [и др.]. — Томск: ТУСУР: 2015. — 187 с. — Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/5376>
3. Волновая оптика : Учебное пособие для вузов / Н. И. Калитеевский. - 4-е изд., стереотип. - СПб. : Лань, 2006. – 465 с.
4. Apache OpenOffice.org Calc [Электронный ресурс] : табличный процессор. URL: <https://www.openoffice.org/product/calc.html>

Учебное пособие

Шандаров С.М.
Акрестина А.С.

Практикум по квантовой и нелинейной оптике:

Методические указания к практическим работам
для студентов направления 12.03.03 «Фотоника и оптоинформатика»

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