

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

С.М. Шандаров  
Н.И. Буримов  
А.А. Шмидт

## **ОПТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА И ФИЗИКА ОПТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ**

Методические указания к практическим занятиям и по самостоятельной работе для  
студентов технических направлений подготовки

Томск 2024

УДК 535:53(075.8)  
ББК 22.34я73  
Ш201

**Шандаров, Станислав Михайлович**

Ш201 Оптическая физика и физика оптических явлений: методические указания к практическим занятиям и по самостоятельной работе для студентов технических направлений подготовки / С.М. Шандаров, Н.И. Буримов, А.А. Шмидт. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2024. – 41 с.

Представлены методические указания к практическим занятиям и по самостоятельной работе. Практические работы направлены на формирование у студентов представлений о фундаментальных основах оптической физики, которая является важным компонентом естественно-научного базиса подготовки студентов.

Одобрено на заседании каф. ЭП, протокол № 05-24 от 08.05.2024 г.

УДК 535:53(075.8)  
ББК 22.34я73

© Шандаров С.М., Буримов Н.И.,  
Шмидт А.А. 2024

© Томск. гос. ун-т систем упр. и  
радиоэлектроники, 2024

## Оглавление

Введение .....	5
Раздел 1 Электромагнитные колебания и волны .....	6
1.1 Содержание раздела.....	6
1.2 Методические указания по изучению раздела .....	6
1.3 Вопросы для самопроверки.....	6
Раздел 2 Фотометрия .....	7
2.1 Содержание раздела.....	7
2.2 Методические указания по изучению раздела .....	7
2.3 Вопросы для самопроверки.....	7
Раздел 3 Отражение и преломление плоских электромагнитных волн на плоской границе раздела.....	8
3.1 Содержание раздела.....	8
3.2 Методические указания по изучению раздела .....	8
3.3 Вопросы для самопроверки.....	8
Раздел 4 Интерференция света .....	9
4.1 Содержание раздела.....	9
4.2 Методические указания по изучению раздела .....	9
4.3 Вопросы для самопроверки.....	9
Раздел 5 Дифракция света .....	10
5.1 Содержание раздела.....	10
5.2 Методические указания по изучению раздела .....	10
5.3 Вопросы для самопроверки.....	11
Раздел 6 Оптика анизотропных сред.....	11
6.1 Содержание раздела.....	11
6.2 Методические указания по изучению раздела .....	11
6.3 Вопросы для самопроверки.....	11
Раздел 7 Основы голографии .....	12
7.1 Содержание раздела.....	12
7.2 Методические указания по изучению раздела .....	12
7.3 Вопросы для самопроверки.....	12
Раздел 8 Дисперсия света .....	13
8.1 Содержание раздела.....	13
8.2 указания по изучению раздела.....	13
8.3 Вопросы для самопроверки.....	13
Раздел 9 Оптика неоднородных сред .....	13
9.1 Содержание раздела.....	13
9.2 Методические указания по изучению раздела .....	13
9.3 Вопросы для самопроверки.....	13
Раздел 10 Рассеяние света .....	14
10.1 Содержание раздела.....	14
10.2 Методические указания по изучению раздела .....	14
10.3 Вопросы для самопроверки.....	14
Раздел 11 Нелинейная оптика .....	14
11.1 Содержание раздела.....	14
11.2 Методические указания по изучению раздела .....	15
11.3 Вопросы для самопроверки.....	15
Раздел 12 Силовая оптика .....	15
12.1 Содержание раздела.....	15
12.2 Методические указания по изучению раздела .....	15
12.3 Вопросы для самопроверки.....	15

Раздел 13 Основы квантовой оптики .....	16
13.1 Содержание раздела.....	16
13.2 Методические указания по изучению раздела.....	16
13.3 Вопросы для самопроверки.....	16
14 Темы для самостоятельного изучения .....	16
15 Темы практических занятий .....	17
16 Примеры решения задач.....	17
16.1 Электромагнитные колебания и волны .....	17
16.1.1 Примеры решения задач по теме «Электромагнитные колебания и волны».....	17
16.1.2 Варианты задач для самоподготовки .....	19
16.2 Отражение и преломление плоских электромагнитных волн на плоской границе раздела .....	22
16.2.1 Примеры решения задач по теме «Отражение и преломление плоских электромагнитных волн на плоской границе раздела» .....	22
16.2.2 Варианты задач для самоподготовки .....	24
16.3 Интерференция света.....	25
16.3.1 Примеры решения задач по теме «Интерференция света».....	25
16.3.2 Варианты задач для самоподготовки .....	26
16.4 Дифракция света .....	27
16.4.1 Примеры решения задач по теме «Дифракция света» .....	27
16.4.2 Варианты задач для самоподготовки .....	27
16.5 Оптика анизотропных сред .....	28
16.5.1 Примеры решения задач по теме «Оптика анизотропных сред» .....	28
16.5.2 Варианты задач для самоподготовки .....	30
16.6 Оптика неоднородных сред .....	31
16.6.1 Примеры решения задач по теме «Оптика неоднородных сред».....	31
16.6.2 Варианты задач для самоподготовки .....	33
16.7 Нелинейная оптика .....	34
16.7.1 Примеры решения задач по теме «Нелинейная оптика» .....	34
16.7.2 Варианты задач для самоподготовки .....	34
17 Подготовка к контрольной работе .....	35
17.1 Теоретические вопросы для письменной контрольной работы по теме «Электромагнитные колебания и волны» .....	35
17.2 Теоретические вопросы для письменной контрольной работы по темам «Дифракция света. Оптика анизотропных сред» .....	37
Заключение .....	38
Список рекомендуемой литературы .....	40

## **Введение**

Целью изучения дисциплин является формирование у студентов представлений о фундаментальных основах оптической физики с учетом современных тенденций развития техники и технологий в своей профессиональной деятельности.

К задачам курсов относятся:

- изучение и освоение студентами современных подходов и методов, используемых для анализа и описания оптических явлений;
- изучение методов обработки и представления данных экспериментальных исследований

## Раздел 1 Электромагнитные колебания и волны

### 1.1 Содержание раздела

Шкала электромагнитных колебаний. Основы теории колебаний. Линейные колебания в системах с одной степенью свободы. Изображение колебательных процессов в фазовом пространстве. Описание электромагнитного излучения оптического диапазона. Уравнения Максвелла в дифференциальной форме, материальные уравнения и граничные условия. Сведение к волновому уравнению. Плоские электромагнитные волны, гармонические плоские волны и их свойства. Поляризация плоских электромагнитных волн. Закон сохранения энергии для электромагнитного поля, вектор Пойнтинга. Сферические волны.

### 1.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Электромагнитные колебания и волны» следует обратить внимание на связь колебательных и волновых процессов и на подходы к их описанию, а также на плоские и сферические электромагнитные волны, как широко используемые модели для описания различных оптических явлений.

### 1.3 Вопросы для самопроверки

1. Как можно описать математически гармоническое колебание? Какими параметрами характеризуется гармоническое колебание?
2. Как связаны между собой частота, период электромагнитных колебаний и длина волны? Какие единицы измерения используются для частоты колебаний?
3. Из каких областей состоит оптический диапазон спектра электромагнитных колебаний? Какие частоты и длины волн соответствуют этим областям?
4. 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 и поясните его вывод из разложения в ряд Тейлора.
5. Какая колебательная система называется линейным осциллятором? Как найти уравнение движения линейного осциллятора?
6. Запишите дифференциальное уравнение, описывающее одномерный линейный осциллятор. Каково его общее решение?
7. Из каких соотношений можно получить уравнение, описывающее свободные колебания заряда в последовательном колебательном контуре?
8. Какой временной зависимостью описываются свободные колебания заряда в последовательном колебательном контуре? Изобразите график данной зависимости.
9. Каким образом можно получить дифференциальное уравнение, описывающее вынужденные колебания в механической системе? В последовательном колебательном контуре? Запишите соответствующие дифференциальные уравнения и поясните все обозначения.
10. Дайте определения понятиям «фазовая плоскость», «изображающая точка», «фазовая траектория». Поясните ответ рисунком.
11. Как можно получить уравнение фазовых траекторий для свободных колебаний в системе с одной степенью свободы?
12. Запишите уравнение фазовых траекторий для свободных колебаний в системе с одной степенью свободы и поясните на его основе особенности движения изображающей точки по фазовой траектории во времени.

13. Нарисуйте фазовый портрет гармонических колебаний и дайте ему физическую трактовку.
14. Нарисуйте фазовый портрет системы с мнимыми собственными частотами и дайте ему физическую трактовку.
15. Нарисуйте фазовый портрет затухающих колебаний и дайте ему физическую трактовку.
16. Нарисуйте фазовый портрет нарастающих колебаний и дайте ему физическую трактовку.
17. Запишите уравнения Максвелла в дифференциальной форме. Поясните все обозначения.
18. Выведите волновое уравнение из уравнений Максвелла в дифференциальной форме для непроводящей изотропной среды, в которой отсутствуют свободные заряды и сторонние токи.
19. Запишите математическую формулировку одномерного волнового уравнения. Поясните все обозначения.
20. Дайте определение понятию фазового или волнового фронта волны.
21. Запишите математическое выражение для напряженности электрического поля плоской электромагнитной волны, распространяющейся в произвольном направлении. Поясните все обозначения.
22. Запишите уравнения Максвелла для плоских гармонических волн в непроводящей среде, в которой также отсутствуют свободные заряды и сторонние токи. Поясните все обозначения.
23. Какое поле называют поляризованным, а какое неполяризованным?
24. Чем отличаются волны с линейной, эллиптической и круговой (левой и правой) поляризациями?
25. Запишите математическое выражение для волнового сопротивления среды, поясните все обозначения. Чему равно волновое сопротивление вакуума как среды распространения?
26. Запишите математическое выражение для фазовой скорости света через материальные параметры среды распространения, а также через скорость света в вакууме и коэффициент преломления. Поясните все обозначения.
27. В чем состоит достоинство комплексного метода при описании гармонических плоских волн?

## **Раздел 2 Фотометрия**

### **2.1 Содержание раздела**

Энергетическая и световая системы фотометрических величин и единицы их измерения. Связь фотометрических величин с вектором Пойнтинга. Принципы построения фотометров. Измерение основных фотометрических величин.

### **2.2 Методические указания по изучению раздела**

При изучении раздела «Фотометрия» следует обратить внимание на связь фотометрических величин с вектором Пойнтинга и на принципы построения фотометров.

### **2.3 Вопросы для самопроверки**

1. Что такое лучистая энергия, или энергия излучения, и в каких единицах она измеряется в энергетической системе фотометрических величин?

2. Что характеризует лучистый поток, или поток излучения, и в каких единицах он измеряется в энергетической системе фотометрических величин?
3. Запишите выражение, определяющее энергетическую яркость, и поясните все обозначения.
4. Дайте определение понятию энергетическая освещенность или облученность в заданной точке пространства. В каких единицах энергетической системы фотометрических величин она измеряется?
5. Запишите математическое выражение, определяющее энергетическую светимость, и поясните все обозначения. В каких единицах она измеряется в энергетической системе фотометрических величин?
6. Дайте определение понятию сила излучения, или энергетическая сила света. В каких единицах она измеряется энергетической системе фотометрических величин?
7. Запишите математическое выражение, определяющее энергетическое освечивание, и поясните все обозначения. В каких единицах оно измеряется в энергетической системе фотометрических величин?
8. Дайте определение понятию энергетическая экспозиция. Запишите определяющее её математическое выражение, поясните все обозначения и укажите единицы, в которых она измеряется в энергетической системе фотометрических величин.
9. Дайте определение понятию спектральной плотности фотометрической величины и запишите определяющее её математическое выражение.
10. С помощью какого соотношения фотометрические величины световой (визуальной) системы образуются от величин энергетической системы? Поясните используемые обозначения.
11. Что характеризует световой вектор, и как он может быть определен?
12. На каком свойстве глаза основаны визуальные фотометры?
13. Какие физические приемники излучения используются в объективных фотометрах?
14. Для измерения какой фотометрической величины может быть использован фотометрический шар?

### **Раздел 3 Отражение и преломление плоских электромагнитных волн на плоской границе раздела**

#### **3.1 Содержание раздела**

Отражение и преломление света на границе раздела прозрачных диэлектриков. Полное внутреннее отражение. Преломление и отражение на поверхности металла. Неоднородные плоские волны, поверхностные электромагнитные волны.

#### **3.2 Методические указания по изучению раздела**

При изучении раздела «Отражение и преломление плоских электромагнитных волн на плоской границе раздела» следует обратить внимание на подход к выводу формул Френеля, на физическую сущность явлений Брюстера и полного внутреннего отражения, и на их использование в оптических элементах и системах.

#### **3.3 Вопросы для самопроверки**

1. Опишите постановку задачи при анализе отражения и преломления плоской монохроматической волны, поляризованной нормально к плоскости падения, на плоской границе двух изотропных немагнитных сред.
2. Запишите выражение, описывающее закон Снеллиуса, и поясните все обозначения.

3. Как вводится коэффициент отражения и коэффициент прохождения света для плоских монохроматических волн?
4. Запишите формулы Френеля для поляризации, нормальной к плоскости падения, и поясните все обозначения.
5. Вычислите коэффициент отражения для волны, падающей нормально из воздуха на границу раздела со средой, имеющей показатель преломления  $n = 1,5$ .
6. Запишите формулы Френеля для волн, поляризованных в плоскости падения, и поясните все обозначения.
7. Какие явления характеризуют модуль и фаза коэффициента отражения?
8. Нарисуйте примерный вид зависимости модуля коэффициента отражения от угла падения для волн, поляризованных нормально к плоскости падения.
9. 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?
10. Почему угол Брюстера называется углом полной поляризации?
11. В чем заключается явление полного внутреннего отражения? Каково должно быть соотношение между оптическими плотностями среды распространения и окружающей среды, чтобы этот эффект наблюдался?
12. Чему равен критический угол полного внутреннего отражения для среды с показателем преломления  $n = 2$ , граничащей с вакуумом?
13. Чему равен модуль коэффициента отражения при угле падения, превышающем критический угол полного внутреннего отражения?
14. По какому закону изменяется амплитуда светового поля в среде, от границы с которой происходит полное внутреннее отражение плоской монохроматической световой волны?
15. Дайте определение неоднородной плоской волны. В какой среде существуют такие волны при полном внутреннем отражении?
16. В каких элементах, устройствах и системах фотоники и оптоинформатики используется явление полного внутреннего отражения?

## **Раздел 4 Интерференция света**

### **4.1 Содержание раздела**

Интерференция монохроматического излучения. Двухлучевая интерференция. Временная и пространственная когерентность оптического излучения. Интерференция частично-когерентного излучения. Методы наблюдения интерференционных картин. Двухлучевые интерферометры Жамена, Маха-Цендера, Рождественского, Майкельсона, Физо. Многолучевая интерференция. Интерферометр Фабри-Перо.

### **4.2 Методические указания по изучению раздела**

При изучении раздела «Интерференция света» следует обратить внимание на подходы к описанию интерференционных явлений, на понятия временной и пространственной когерентности, а также на методы наблюдения интерференционных картин и на схемные реализации двухлучевых интерферометров.

### **4.3 Вопросы для самопроверки**

1. Как можно найти интенсивность светового поля, создаваемого несколькими источниками света, в виде суммы аддитивного и интерференционного членов?

2. Что представляет собой интерференционная картина? Как она может быть реализована?

3. Опишите подход, позволяющий найти распределение интенсивности света в картине интерференции двух плоских монохроматических световых волн одинаковой частоты.

4. Поясните понятие «контраст интерференционной картины» на примере распределения интенсивности при интерференции двух плоских монохроматических световых волн одинаковой частоты.

5. Запишите математическое выражение для распределения интенсивности света в интерференционной картине, наблюдаемой в интерферометре Юнга, поясните все обозначения.

6. Где наблюдается светлая интерференционная полоса нулевого порядка при использовании интерферометра Юнга?

7. Дайте определение понятия «когерентность».

8. Как можно определить контраст интерференционной картины по распределению интенсивности света в случае интерференции волн, не являющихся монохроматическим?

9. Сформулируйте определение для понятия «время когерентности». Как оно связано шириной спектра излучения?

10. Запишите математическое выражение для длины когерентности, поясните все обозначения. Найдите длину когерентности для лазера, генерирующего излучение с шириной спектра 300 МГц.

11. Каким должно быть соотношение между длиной когерентности и разностью хода двух волн для получения контрастной интерференционной картины?

12. Чем определяется пространственная когерентность источника излучения?

13. Как реализуется интерференционная картина в виде полос равной толщины?

14. Нарисуйте схему наблюдения интерференционной картины в виде колец Ньютона.

15. Как можно получить интерференционную картину в виде полос равного наклона?

16. Поясните, каким способом можно просветлять оптические элементы.

17. Поясните способ получения интерференционной картины с помощью бипризмы Френеля.

18. Поясните способ получения интерференционной картины с помощью зеркала Ллойда.

19. Опишите схему интерферометра Майкельсона. Как с помощью него можно измерить длину когерентности источника излучения?

20. Опишите принцип измерения показателей преломления газообразных и жидких веществ с помощью интерферометра Маха-Цендера.

21. Нарисуйте оптическую схему интерферометра Жамена. В чем заключается его достоинство?

## **Раздел 5 Дифракция света**

### **5.1 Содержание раздела**

Полевой и спектральный методы описания. Приближение геометрической оптики. Принцип Гюйгенса-Френеля. Задача о дифракции на плоском экране. Граничные условия Кирхгофа. Дифракция Френеля и Фраунгофера. Дифракция лазерных пучков. Дифракционные решетки и спектральные приборы на их основе.

### **5.2 Методические указания по изучению раздела**

При изучении раздела «Дифракция света» следует обратить внимание на постановку задачи дифракции, граничные условия Кирхгофа, приближения Френеля и Фраунгофера.

### 5.3 Вопросы для самопроверки

1. В чем заключается явление дифракции электромагнитных (световых) волн?
2. Сформулируйте граничные условия Кирхгофа.
3. Запишите интеграл Френеля – Кирхгофа для случая дифракции на отверстии в непрозрачном экране.
4. Сформулируйте принцип Гюйгенса – Френеля.
5. В чем заключаются дифракционные приближения Френеля?
6. В чем заключаются дифракционные приближения Фраунгофера?
7. Нарисуйте распределение интенсивности в дифракционной картине Фраунгофера на прямоугольном отверстии.
8. Чем отличаются дифракционные картины для круглого и прямоугольного отверстий?
9. Как преобразуются лазерные пучки с гауссовым профилем при распространении в свободном пространстве?
10. Как преобразуется лазерный пучок с гауссовым профилем тонкой линзой?
11. Опишите возможную реализацию амплитудной дифракционной решетки.
12. Запишите математическое выражение для условия главных максимумов интенсивности, наблюдаемых при использовании дифракционной решетки.
13. Какова зависимость угловой дисперсии дифракционной решетки от порядка дифракционного максимума?

## Раздел 6 Оптика анизотропных сред

### 6.1 Содержание раздела

Диэлектрический тензор анизотропной среды. Распространение и свойства плоских волн в анизотропных средах. Фазовая и групповая скорость. Классификация анизотропных сред. Распространение света в одноосных и двуосных кристаллах. Оптическая активность. Искусственная анизотропия: эффекты Погкельса и Фарадея, квадратичный электрооптический эффект и фотоупругость. Поляризационные устройства.

### 6.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Оптика анизотропных сред» следует обратить внимание на подходы к описанию распространения световых волн в таких средах с использованием тензорных моделей их физических свойств и на широкое применение эффектов искусственной анизотропии в оптических элементах и устройствах фотоники и оптоинформатики.

### 6.3 Вопросы для самопроверки

1. Тензорами какого ранга описываются диэлектрическая и магнитная проницаемости и проводимость среды?
2. Как можно записать тензор второго ранга для кубических кристаллов?
3. Какой вид имеет тензор второго ранга в одноосных кристаллах?
4. С каким явлением связана дисперсия диэлектрической проницаемости прозрачных сред на оптических частотах?
5. С чем связано явление пространственной дисперсии диэлектрической проницаемости прозрачных сред на оптических частотах?
6. Каковы характерные особенности распространения плоских световых волн в оптически неактивных изотропных средах?

7. В чем заключается явление естественной оптической активности при распространении световых волн в гиротропных оптически изотропных средах?
8. Что такое *циркулярное двулучепреломление*?
9. Каковы свойства *собственных (нормальных) волн среды*?
10. Чем отличаются друг от друга *обыкновенные и необыкновенные световые волны* в одноосных кристаллах?
11. Как ориентирован вектор поляризации обыкновенной световой волны в одноосном кристалле?
12. Как ориентирован вектор поляризации необыкновенной световой волны в одноосном кристалле?
13. В чем суть явления «линейный электрооптический эффект Поккельса»? В каких кристаллах он наблюдается?
14. В чем суть явления «квадратичный электрооптический эффект Керра»?
15. В чем суть явления «фотоупругий эффект»? Тензором какого ранга он описывается?
16. В чем суть явления «эффект Фарадея»?

## **Раздел 7 Основы голографии**

### **7.1 Содержание раздела**

Физические принципы голографии: голограмма точечного источника, уравнение голограммы, типы и свойства голограмм. Техника голографического эксперимента. Динамическая голография. Голографическая интерферометрия: принцип, методы, оптические схемы установок. Спекл-интерферометрия.

### **7.2 Методические указания по изучению раздела**

При изучении раздела «Основы голографии» следует обратить внимание на такие свойства голограмм, как возможность регистрации и последующего восстановления волнового поля объекта.

### **7.3 Вопросы для самопроверки**

1. Что представляет собой голограмма точечного объекта?
2. Для какой цели используется опорная волна при записи голограммы?
3. Как изменится изображение, восстановленное с голограммы, если при её считывании использовать излучение с длиной волны, отличной от применяемой при записи?
4. Какова оптическая схема записи *голограммы Фраунгофера*?
5. Какова оптическая схема записи *голограммы Френеля*?
6. Какова оптическая схема записи *голограммы Фурье*?
7. Какова оптическая схема записи *отражательной объемной голограммы* по методу Ю.Н. Денисюка?
8. Какие физические явления используются в фоторефрактивных кристаллах для формирования объемных фазовых динамических голограмм?
9. Что является предметом голографической интерферометрии?
10. Что представляет собой спекл-структура оптического изображения, и каковы физические причины её возникновения?

## Раздел 8 Дисперсия света

### 8.1 Содержание раздела

Классическая теория дисперсии: уравнение дисперсии и его решение, нормальная и аномальная дисперсия. Пространственная дисперсия. Распространение волновых пакетов, фазовая и групповая скорости, дисперсионное расщепление световых импульсов.

### 8.2 указания по изучению раздела

При изучении раздела «Дисперсия света» следует обратить внимание на физическую суть явлений, обуславливающих спектральные зависимости параметров среды, и на понятия фазовой и групповой скорости.

### 8.3 Вопросы для самопроверки

1. При каком ограничивающем условии линейная комбинация плоских волн с различными частотами и волновыми числами описывает *волновой пакет (волновую группу)*?
2. Что такое *огibaющая волнового пакета*?
3. Запишите математическое выражение для *групповой скорости* волны (волнового пакета) в среде с дисперсией, поясните все обозначения.
4. Какую дисперсию среды называют *нормальной*?
5. Какую дисперсию среды называют *аномальной*?
6. Какие свойства среды определяет *действительная часть комплексного показателя преломления*?
7. Какие свойства среды описывает *мнимая часть комплексного показателя преломления*?
8. Запишите математическое выражение для частотной зависимости диэлектрической восприимчивости среды в рамках *квазиупругой модели*. Поясните все обозначения.
9. Какими параметрами среды определяется *плазменная (лэнгмюровская) частота*?

## Раздел 9 Оптика неоднородных сред

### 9.1 Содержание раздела

Оптические волноводы. Моды планарных волноводов. Волоконные световоды и их моды. Электромагнитные волны в периодических структурах. Блоховские волны и зонная структура. Брэгговское отражение.

### 9.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Оптика неоднородных сред» следует обратить внимание на подходы к описанию мод оптических волноводов и к анализу полос непрозрачности в периодических структурах.

### 9.3 Вопросы для самопроверки

1. Нарисуйте картину распространения света в оптическом волноводе в приближении геометрической оптики.
2. В чем отличие *полосковых волноводов* от *планарных*?

3. Чем *пленочные* волноводы отличаются от *градиентных*?
4. Какие компоненты электрического и магнитного полей присутствуют в ТЕ-модах?
5. Какие компоненты электрического и магнитного полей присутствуют в ТМ-модах?
6. Какая лучевая картина соответствует *излучательной моде подложки* некоторой пленочной волноводной структуры?
7. Какие значения может принимать эффективный показатель преломления *волноводной моды*?
8. Какие значения может принимать эффективный показатель преломления *излучательной моды*?
9. Каким должен быть поперечный профиль показателя преломления волоконного световода?
10. Что такое *частота отсечки моды* волоконного световода?
11. Что такое *полоса непрозрачности* периодической структуры?

## Раздел 10 Рассеяние света

### 10.1 Содержание раздела

Поляризуемость молекул и рассеяние Рэлея. Рассеяние Ми. Молекулярное рассеяние света. Комбинационное рассеяние света. Рассеяние Мандельштама-Бриллюэна. Прохождение света через случайно-неоднородную среду.

### 10.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Рассеяние света» следует обратить внимание на физическую природу рассеяния при его различных механизмах.

### 10.3 Вопросы для самопроверки

1. При каком условии в неоднородной среде при распространении светового пучка наблюдается *рэлеевское рассеяние*?
2. При каком условии в неоднородной среде при распространении светового пучка наблюдается *рассеяние Ми*?
3. Как выглядит индикатриса рассеяния линейно поляризованного света в случае *рассеяния Рэлея*?
4. Какова физическая причина *молекулярного рассеяния* света?
5. Какие физические явления обуславливают *комбинационное рассеяние* света?
6. Какие изменения спектра светового излучения наблюдаются при *рассеянии Мандельштама-Бриллюэна*?

## Раздел 11 Нелинейная оптика

### 11.1 Содержание раздела

Нелинейный отклик среды, самовоздействие света. Самофокусировка и пространственные солитоны. Нелинейные явления второго порядка: общая методология, нелинейная поляризация, условия фазового синхронизма. Генерация гармоник, волн суммарных и разностных частот; параметрическая генерация. Четырехволновые смешения и обращение волнового фронта. Вынужденное комбинационное рассеяние, вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна.

## 11.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Нелинейная оптика» следует обратить внимание на общие подходы к описанию нелинейности свойств среды и на важную роль условий синхронизма при нелинейном взаимодействии световых волн.

### 11.3 Вопросы для самопроверки

1. Как найти нелинейную электрическую поляризацию среды при воздействии на неё двух монохроматических полей с различными частотами? На каких частотах она будет проявляться при учете нелинейных явлений второго порядка?

2. Запишите условия синхронизма для генерации волны суммарной частоты в нелинейной среде. Поясните их физический смысл; расшифруйте все обозначения.

3. Опишите эксперимент по первому наблюдению генерации второй гармоники в кристалле кварца.

4. Поясните, как можно реализовать фазовый синхронизм при генерации второй гармоники в оптически отрицательном одноосном кристалле.

5. Запишите соотношения Мэнли-Роу для процесса параметрического взаимодействия трех световых волн. Дайте физическую трактовку этим соотношениям.

6. Нарисуйте схему параметрического генератора света и поясните физические явления, которые в нем используются.

7. Нарисуйте схему взаимодействия пучков на динамической голограмме, используемой для обращения волнового фронта световых пучков.

8. Какие законы сохранения имеют место при вынужденном комбинационном рассеянии света?

9. С возбуждением каких волновых процессов связано вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна?

10. Опишите физические явления, позволяющие реализовать распространение светлого пространственного солитона в нелинейной среде.

## Раздел 12 Силовая оптика

### 12.1 Содержание раздела

Сверхсильные световые поля. Оптический пробой в газах и твердых телах. Лазерно-индуцированная плазма.

## 12.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Силовая оптика» следует обратить внимание на общие подходы к описанию нелинейности свойств среды и на важную роль условий синхронизма при нелинейном взаимодействии световых волн.

### 12.3 Вопросы для самопроверки

1. Какие подходы используются для создания сверхсильных световых полей?

2. Какие физические принципы используются для генерации предельно коротких импульсов света?

3. Какие две стадии имеют место при возникновении оптического пробоя в газе?

4. Как связан порог оптического пробоя в твердых телах с порогом пробоя в постоянном поле?

5. Как влияет на порог оптического пробоя в твердых телах эффект самофокусировки?
6. Как соотносятся между собой пороговые значения оптического пробоя на поверхности и в объеме твердого тела?
7. Какие нелинейные оптические явления наблюдаются в лазерно-индуцированной плазме?

## **Раздел 13 Основы квантовой оптики**

### **13.1 Содержание раздела**

Постоянная Планка. Постулаты Бора. Корпускулярно-волновой дуализм. Физическая интерпретация волн де Бройля. Соотношение неопределенностей. Энергетические уровни. Квантовые переходы. Фотоэффект. Принцип квантового усиления электромагнитных волн.

### **13.2 Методические указания по изучению раздела**

При изучении раздела «Основы квантовой оптики» следует обратить внимание на квантовую природу светового излучения и обоснование принципа квантового усиления электромагнитных волн.

### **13.3 Вопросы для самопроверки**

1. Какие элементарные частицы переносят световое излучение?
2. Какова суть физического явления, которое получило название «красная граница фотоэффекта»?
3. Какой закон сохранения отражает правило частот Бора?
4. Чему равен квазиимпульс фотона?
5. Как ширина энергетического уровня связана с временем жизни частицы на данном уровне?
6. Каков закон распределения частиц по энергетическим уровням в состоянии термодинамического равновесия?
7. Какие типы квантовых переходов между энергетическими уровнями могут происходить?
8. Каковы особенности индуцированного излучения?
9. Какое состояние вещества называют «состоянием инверсии населенностей»?
10. В чем заключается принцип квантового усиления электромагнитных волн?
11. Какова роль оптического резонатора в лазере?

## **14 Темы для самостоятельного изучения**

Темы для самостоятельного изучения обобщают приобретенные знания и позволяют студенту самостоятельно решать задачи. Тематика самостоятельных работ предполагает углубленное изучение ниже предложенных тем.

1. Измерение основных фотометрических величин
2. Преломление и отражение на поверхности металла
3. Многолучевая интерференция. Интерферометр Фабри-Перо
4. Приближение геометрической оптики
5. Поляризационные устройства
6. Спекл-интерферометрия
7. Пространственная дисперсия
8. Волоконные световоды и их моды

9. Прохождение света через случайно-неоднородную среду
10. Вынужденное комбинационное рассеяние
11. Вынужденное рассеяние Манделштама-Бриллюэна
12. Лазерно-индуцированная плазма.
13. Физическая интерпретация волн де Бройля
14. Фотоэффект

## 15 Темы практических занятий

На практических занятиях студенты рассматривают варианты задач. Целью занятий является углубление понимания процессов, происходящих в системах и устройствах когерентной и нелинейной оптики. Уделяется внимание таким вопросам, как нелинейная поляризация среды, преобразование частоты лазерного излучения, распространение световых пучков в нелинейной среде, оптические пространственные солитоны.

Перед практическими занятиями студент должен повторить лекционный материал, ответив на вопросы для самоконтроля по необходимой теме, а также просмотреть рекомендации по решению типичных задач этой темы. Темы практических занятий приведены ниже:

1. Электромагнитные колебания и волны.
2. Отражение и преломление плоских электромагнитных волн на плоской границе раздела.
3. Интерференция света.
4. Дифракция света.
5. Оптика анизотропных сред.
6. Оптика неоднородных сред.
7. Нелинейная оптика.

## 16 Примеры решения задач

### 16.1 Электромагнитные колебания и волны

#### 16.1.1 Примеры решения задач по теме «Электромагнитные колебания и волны»

##### Задача 1.

Для последовательного колебательного контура (см. рисунок 1) 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.

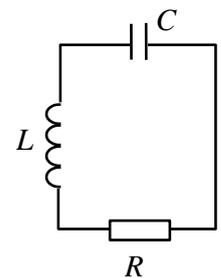


Рисунок 1

**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  $U_R(0) = U_{R0} = 1 \text{ В}$ . 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  $U_m = U_{R0}/(CR\omega_1) \approx U_{R0}/(CR\omega_0) = 50 \text{ В}$ . 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  $U_m = U_{R0}/(CR\omega_1) \approx U_{R0}/(CR\omega_0) = 50 \text{ В}$ ,  $\omega_1 \approx \omega_0 = 1 \cdot 10^8 \text{ рад/с}$  и  $\gamma = 1 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ .

**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  $\vec{\delta}_{\text{compl}} = \vec{\delta}_{\text{disp}} = \partial \vec{D} / \partial t$  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:

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

### 16.1.2 Варианты задач для самоподготовки

**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.

**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.

**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.

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.

5. В последовательном колебательном контуре (см. рисунок 2) 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.

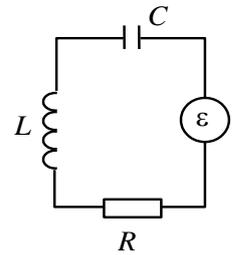


Рисунок 2

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

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.

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.

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.

10. Из уравнений Максвелла показать, что линии полного тока непрерывны.

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

12. Проводящий диэлектрик, изображенный на рисунке 3, 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  $\varepsilon = 30\varepsilon_0$ ,  $\sigma = 10^{-9}$  Ом $^{-1}$ ·м $^{-1}$ ,  $d = 10$  мм.

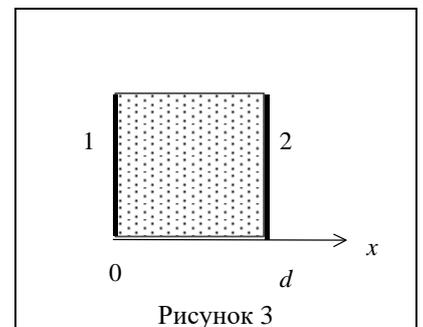


Рисунок 3

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

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

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.

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.

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.

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  $z < 0$ .

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.

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.

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.

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  $\varepsilon_r = 16$ .

23. Плоская монохроматическая волна с длиной волны  $\lambda = 500 \text{ нм}$  и амплитудой  $E_m = 10 \text{ В/м}$ , 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.

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.

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  $E_m = 10 \text{ В/м}$ .

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.

27. Гармоническая плоская волна с частотой  $\omega = 4\pi \cdot 10^{14} \text{ рад/с}$  распространяется в немагнитной среде с относительной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_r = 2,25$  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.

**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.

**29.** Для электромагнитной волны, поляризованной по оси  $z$ , распространяющейся вдоль оси  $x$  в диэлектрической среде с относительными проницаемостями  $\epsilon_r = 4$  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.

**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.

**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.

**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.

**33.** Для световой волны, распространяющейся вдоль оси  $x$  в непроводящей среде с параметрами  $\epsilon = 4\epsilon_0$  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.

**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.

**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.

**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.

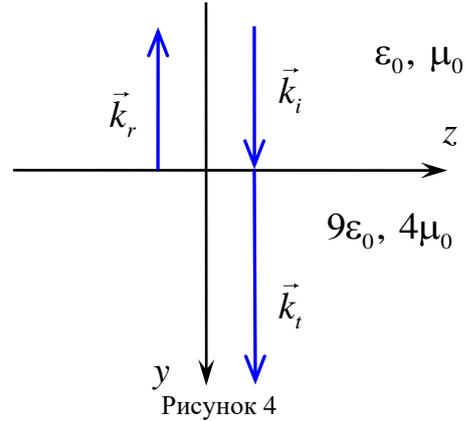
## 16.2 Отражение и преломление плоских электромагнитных волн на плоской границе раздела

### 16.2.1 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 4. Полагая все волны поляризованными по  $x$ , запишем выражения для их полей электрической напряженности:



$$\vec{E}_i(y,t) = i\dot{E}_{im} \exp[i(\omega t - n_1 k_0 y)], \quad (2.1)$$

$$\vec{E}_r(y,t) = i\dot{E}_{rm} \exp[i(\omega t + n_1 k_0 y)], \quad (2.2)$$

$$\vec{E}_t(y,t) = i\dot{E}_{tm} \exp[i(\omega t - n_2 k_0 y)], \quad (2.3)$$

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  $|\dot{H}_m|$  через  $|\dot{E}_m|$  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:

$$H_{rz}(y,t) = \frac{\dot{E}_{rm}}{W_1} \exp[i(\omega t + n_1 k_0 y)], \quad (2.4)$$

$$H_{tz}(y,t) = -\frac{\dot{E}_{tm}}{W_1} \exp[i(\omega t - n_2 k_0 y)]. \quad (2.5)$$

Приравняв далее в соответствии 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:

$$\begin{cases} \dot{E}_{im} + \dot{E}_{rm} = \dot{E}_{tm}, \\ -\dot{E}_{im} + \dot{E}_{rm} = -\frac{W_1}{W_2} \dot{E}_{tm}. \end{cases} \quad (2.6)$$

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

$$-\dot{E}_{im} + \dot{E}_{rm} = -\frac{W_1}{W_2} (\dot{E}_{im} + \dot{E}_{rm}). \quad (2.7)$$

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

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

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  $R = -0,2$ .

### 16.2.2 Варианты задач для самоподготовки

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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

## 16.3 Интерференция света

### 16.3.1 Примеры решения задач по теме «Интерференция света»

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

$$\dot{\vec{E}}_1(\vec{r}, t) = \dot{E}_{m1} \vec{k}^0 \exp\left\{i\left[\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} n(x \cos \theta + y \sin \theta)\right]\right\}, \quad (3.1)$$

$$\dot{\vec{E}}_2(\vec{r}, t) = \dot{E}_{m2} \vec{k}^0 \exp\left\{i\left[\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} n(x \cos \theta - y \sin \theta)\right]\right\}, \quad (3.2)$$

где введен угол  $\theta = \theta_1 = -\theta_2$ . Полное световое поле в среде является линейной суперпозицией полей этих волн:  $\dot{\vec{E}}(\vec{r}, t) = \dot{\vec{E}}_1(\vec{r}, t) + \dot{\vec{E}}_2(\vec{r}, t)$ . 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:

$$\begin{aligned} I(\vec{r}) &= \left( \dot{E}_{m1} \vec{k}^0 \exp\left\{i\left[\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} n(x \cos \theta + y \sin \theta)\right]\right\} + \dot{E}_{m2} \vec{k}^0 \exp\left\{i\left[\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} n(x \cos \theta - y \sin \theta)\right]\right\} \right) \cdot \\ &\cdot \left( \dot{E}_{m1}^* \vec{k}^0 \exp\left\{-i\left[\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} n(x \cos \theta + y \sin \theta)\right]\right\} + \dot{E}_{m2}^* \vec{k}^0 \exp\left\{-i\left[\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} n(x \cos \theta - y \sin \theta)\right]\right\} \right) = \\ &= |\dot{E}_{m1}|^2 + |\dot{E}_{m2}|^2 + \dot{E}_{m1} \dot{E}_{m2}^* \exp\left[-i\frac{4\pi}{\lambda} n y \sin \theta\right] + \dot{E}_{m2} \dot{E}_{m1}^* \exp\left[i\frac{4\pi}{\lambda} n y \sin \theta\right]. \end{aligned} \quad (3.3)$$

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

$$\begin{aligned} I(y) &= E_{m1}^2 + E_{m2}^2 + 2E_{m1}E_{m2} \cos\left[\left(\frac{4\pi}{\lambda} n \sin \theta\right)y\right] = \\ &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left[\frac{2\pi}{\Lambda} y\right], \end{aligned} \quad (3.4)$$

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

### 16.3.2 Варианты задач для самоподготовки

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 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.

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.

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

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. Для интерферометра Юнга, изображенного на рисунке 5, выведите выражение для разности хода  $r_2' - r_1'$  в параксиальном приближении.

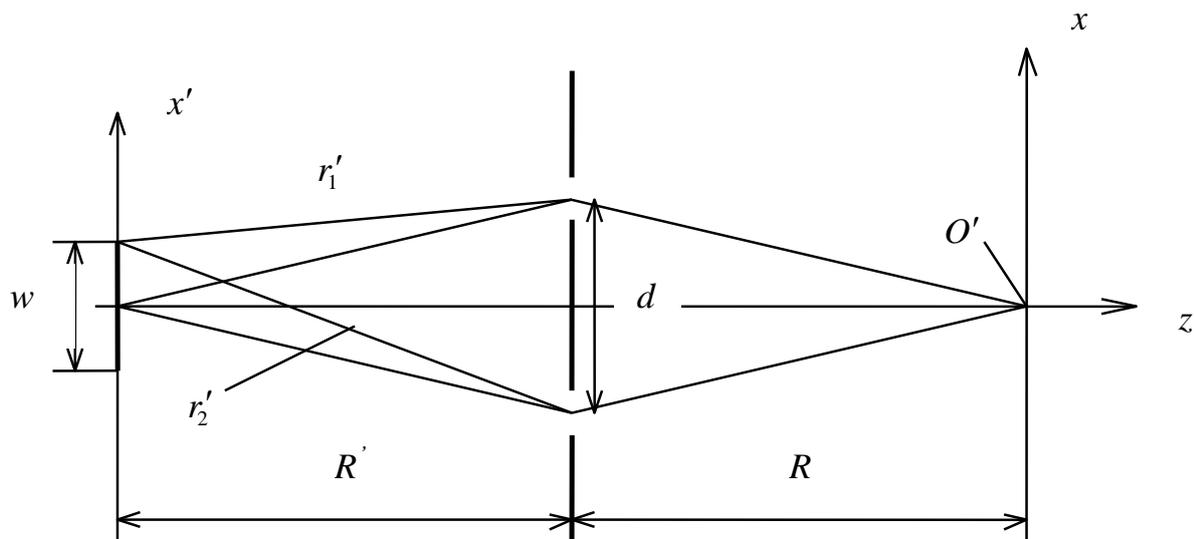


Рисунок 5

## 16.4 Дифракция света

### 16.4.1 Примеры решения задач по теме «Дифракция света»

**Задача 1.** Узкая щель шириной  $b = 40$  мкм освещается монохроматическим излучением с плоским волновым фронтом (см. рисунок 6) 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.

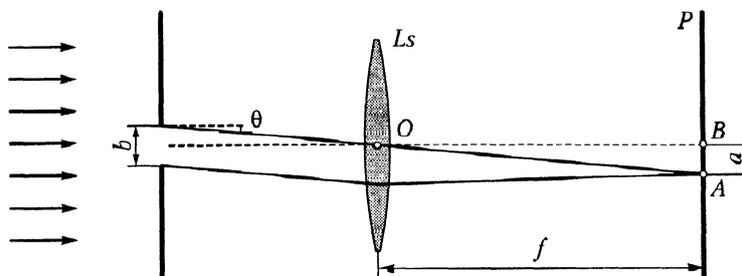


Рисунок 6

**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.

### 16.4.2 Варианты задач для самоподготовки

**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).

2. Плоская монохроматическая волна с интенсивностью  $I_0$  падает по нормали на круглое отверстие с радиусом  $r = 1,2$  мм (см. рисунок 7). Расстояние  $a$  велико; длина волны составляет  $\lambda = 640$  нм. Найдите интенсивность в точке  $B$  при  $b = 1,5$  м.

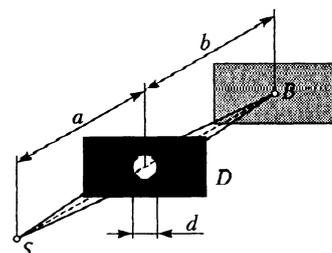


Рисунок 7

3. На рисунке 8 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?

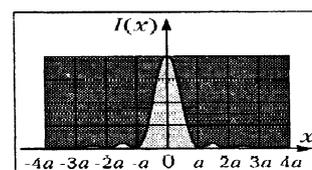


Рисунок 8

4. Как изменится дифракционная картина главных максимумов, если у амплитудной решетки  $G$  (см. рисунок 9) с периодом 6 мкм увеличить ширину щелей до 2 мкм? Исходную ширину щели считать бесконечно малой.

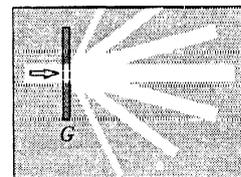


Рисунок 9

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.

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? (см рисунок 10)

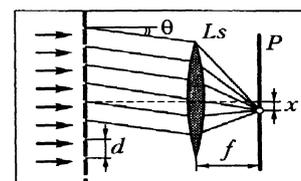


Рисунок 10

## 16.5 Оптика анизотропных сред

### 16.5.1 Примеры решения задач по теме «Оптика анизотропных сред»

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

Примите во внимание, что в кристалле данной симметрии:

- 1)  $\epsilon_{ik}(\omega, 0) = \epsilon_0 n_0^2 \delta_{ik}$ , 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

$$\varepsilon_{ij}^r = \frac{\varepsilon_{ij}^{(0)}}{\varepsilon_0} - i \frac{\sigma_{ij}}{\varepsilon_0 \omega} - i \delta_{ijk} g_{kl} m_l, \quad (5.1)$$

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:**

$$\varepsilon(\omega, \vec{k}) = \begin{vmatrix} n_0^2 & 0 & -i g_0 \\ 0 & n_0^2 & 0 \\ i g_0 & 0 & n_0^2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} n_0^2 & 0 & -i 2n_0 \rho / k_0 \\ 0 & n_0^2 & 0 \\ i 2n_0 \rho / k_0 & 0 & n_0^2 \end{vmatrix}.$$

**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:

$$\left[ n^2 (\delta_{ij} - m_i m_j) - \varepsilon_{ij}^r \right] e_j = 0. \quad (5.2)$$

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  $y$ :

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

## 16.5.2 Варианты задач для самоподготовки

**1.** Вектор напряженности электрического поля в одноосном кристалле задан в виде  $\vec{E} = 10 \left( \frac{\vec{i}}{\sqrt{2}} + \frac{\vec{k}^0}{\sqrt{2}} \right)$  В/м, а компоненты тензора диэлектрической проницаемости равны  $\varepsilon_{\perp} = 4\varepsilon_0$  и  $\varepsilon_{\parallel} = 2\varepsilon_0$ .

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.

**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.

**3.** Используя полученное в предыдущей задаче **1** волновое уравнение и решение в виде плоской электромагнитной волны  $\vec{E}(z, t) = \vec{i} E^m \exp[i(\omega t - kz)]$ , распространяющейся в одноосном кристалле, найдите аналитическое выражение для волнового числа  $k$ .

**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).

**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  $x$ .

**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.

**7.** Используя полученную при решении задачи **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.

**8.** Плоская монохроматическая световая волна с длиной волны 633 нм, распространяющаяся в кристалле симметрии 23 с показателем преломления  $n_0 = 2,58$  и удельным оптическим вращением  $\rho = 6,0^\circ / \text{мм}$  вдоль оси  $x$ , на входной грани, при  $x = 0$ , имеет векторную амплитуду  $\vec{E}^{(m0)} = E^{(m0)} (\vec{y}^0 + \vec{z}^0) / \sqrt{2}$ .

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

**9.** Плоская монохроматическая световая волна с длиной волны 633 нм в одноосном кристалле, имеющем компоненты тензора относительной диэлектрической проницаемости,

равные  $\varepsilon_{\perp} = n_0^2$  и  $\varepsilon_{\parallel} = n_e^2$ , где  $n_e = 2,202$  и  $n_0 = 2,2868$  – обыкновенный и необыкновенный показатели преломления, соответственно, имеет единичный вектор волновой нормали, ориентированный в плоскости  $YZ$  под углом  $45^\circ$  к оптической оси  $z$ .

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

**10.** Плоская монохроматическая световая волна с длиной волны  $628$  нм падает нормально на пластинку из кристаллического кварца ( $n_0 = 1,54282$ ;  $n_e = 1,55188$ ), 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  $45^\circ$  к оптической оси  $z$ .

**11.** Кристалл титаната висмута (класс симметрии 23), имеющий показатель преломления  $n_0 = 2,58$  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.

**12.** Используя условия предыдущей задачи **11**, найдите возмущения компонент тензора относительной диэлектрической проницаемости кристалла титаната висмута, наведенные приложенным электрическим полем.

**13.** К кристаллу ниобата лития приложено электрическое поле с напряженностью  $50$  кВ/см вдоль оси  $y$ . Используя значения показателей преломления  $n_0 = 2,2868$ ,  $n_e = 2,202$  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.

**14.** В кристалле титаната висмута (класс симметрии 23) среза (100), имеющем показатель преломления  $n_0 = 2,58$  и электрооптический коэффициент  $r_{41} = 5$  пм/В на длине волны  $633$  нм, сформирована отражательная фоторефрактивная решетка с распределением электрического поля  $\vec{E}^0(x) = \vec{x}^0 E^{m0} \cos(Kx)$ , с 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.

## 16.6 Оптика неоднородных сред

### 16.6.1 Примеры решения задач по теме «Оптика неоднородных сред»

**Задача 1.** Для пленочного планарного волновода из  $Ta_2O_5$  с показателем преломления  $n_0 = 2,08$ , нанесенного на стеклянную подложку с показателем преломления  $n_1 = 1,51$ , определите минимально необходимую толщину волноводного слоя для моды  $TE_2$ , возбуждаемой излучением с длиной волны  $633$  нм. Покровной средой в данной структуре является воздух.

**Решение.** Воспользуемся общим соотношением для минимальной толщины:

$$\left(\frac{h}{\lambda}\right)_{\min} = \frac{1}{2\pi\sqrt{n_0^2 - n_1^2}} \left\{ \pi p + \arctg \left[ \left(\frac{n_0}{n_1}\right)^x \sqrt{\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_0^2 - n_1^2}} \right] \right\}. \quad (6.1)$$

Для моды  $TE_2$  имеем  $\chi = 0$  и  $p = 2$ . Принимая показатель преломления покровной среды (воздух)  $n_2 = 1$ , получаем  $h_{\min} = 490$  нм.

**Ответ:** Минимальная толщина, необходимая для возбуждения моды  $TE_2$ , составляет 490 нм.

**Задача 2.** Световое поле в непроводящей немагнитной среде с показателем преломления  $n_0$  имеет следующее распределение:

$$\vec{E}(x, z, t) = \vec{j} E_{my}(x) \exp[i(\omega t - \beta z)].$$

Считая сторонние токи и свободные заряды отсутствующими, найдите выражение для компонент вектора магнитной напряженности этого поля, при условии их независимости от  $y$ .

Получите общее уравнение, которому удовлетворяет функция, описывающая поперечное распределение поля  $E_{my}(x)$ .

**Решение.** Воспользуемся уравнениями Максвелла для гармонических волн в комплексной форме

$$\nabla \times \vec{E} = -i\omega\mu_0 \vec{H}, \quad (6.2)$$

$$\nabla \times \vec{H} = i\omega\varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E}, \quad (6.3)$$

где учтено, что среда является немагнитной. Подставляя заданное в условиях решение в первое из приведенных выше уравнений Максвелла, получаем

$$i\beta E_{my} = -i\omega\mu_0 H_{mx}, \quad (6.2)$$

$$\frac{\partial E_{my}}{\partial x} = -i\omega\mu_0 H_{mz}, \quad (6.3)$$

$$\vec{H}(x, z, t) = [\vec{i} H_{mx}(x) + \vec{k}^0 H_{mz}(x)] \exp[i(\omega t - \beta z)]. \quad (6.4)$$

Таким образом, компоненты вектора магнитной напряженности этого поля  $H_{mx}(x)$  и  $H_{mz}(x)$  могут быть выражены через функцию  $E_{my}(x)$  в следующем виде

$$H_{mx} = -\frac{\beta}{\omega\mu_0} E_{my}, \quad (6.5)$$

$$H_{mz} = \frac{i}{\omega\mu_0} \frac{\partial E_{my}}{\partial x}. \quad (6.6)$$

Чтобы получить общее уравнение, которому удовлетворяет функция, описывающая поперечное распределение поля  $E_{my}(x)$ , необходимо дополнить последние два уравнения ещё одним, связывающим эти же функции. Подставляя полученное решение для  $\vec{H}(x, z, t)$  во второе из приведенных здесь уравнений Максвелла, получаем

$$-i\beta H_{mx} - \frac{\partial H_{mz}}{\partial x} = i\omega\varepsilon_0 n_0^2 E_{my}, \quad (6.7)$$

где учтено соотношение  $\varepsilon_r = n_0^2$ , справедливое для рассматриваемой немагнитной изотропной среды. Подставляя в полученное уравнение найденные выше выражения для  $H_{mx}(x)$  и  $H_{mz}(x)$ , после простых преобразований получаем общее (волновое) уравнение, которому удовлетворяет функция, описывающая поперечное распределение поля  $E_{my}(x)$  в рассматриваемом случае

$$\frac{\partial^2 E_{my}}{\partial x^2} + (k_0^2 n_0^2 - \beta^2) E_{my} = 0, \quad (6.8)$$

где  $k_0 = \omega\sqrt{\mu_0\varepsilon_0} = \omega/c = 2\pi/\lambda$  – волновое число для свободного пространства.

**Ответ:** 1. Выражения для вектора магнитной напряженности и его компонент:

$$\vec{H}(x, z, t) = [\vec{i}H_{mx}(x) + \vec{k}^0 H_{mz}(x)] \exp[i(\omega t - \beta z)],$$

$$H_{mx} = -\frac{\beta}{\omega \mu_0} E_{my},$$

$$H_{mz} = \frac{i}{\omega \mu_0} \frac{\partial E_{my}}{\partial x}.$$

2. Общее уравнение, которому удовлетворяет функция, описывающая поперечное распределение поля  $E_{my}(x)$ :

$$\frac{\partial^2 E_{my}}{\partial x^2} + (k_0^2 n_0^2 - \beta^2) E_{my} = 0.$$

### 16.6.2 Варианты задач для самоподготовки

1. Для пленочного планарного волновода из  $\text{Si}_3\text{N}_4$  с показателем преломления  $n_0 = 1,90$ , нанесенного на подслои  $\text{SiO}_2$  с показателем преломления  $n_1 = 1,46$ , определите минимально необходимую толщину волноводного слоя для мод  $\text{TE}_0$  и  $\text{TM}_0$ , возбуждаемых излучением с длиной волны 633 нм. Покровной средой в данной структуре является воздух.

2. Световое поле в непроводящей немагнитной среде с показателем преломления  $n_0$  имеет следующее распределение магнитного поля:

$$\vec{H}(x, z, t) = \vec{j} H_{my}(x) \exp[i(\omega t - \beta z)].$$

- 1) Считая сторонние токи и свободные заряды отсутствующими, найдите выражение для компонент вектора электрической напряженности этого поля, при условии их независимости от  $y$ .
- 2) Получите общее уравнение, которому удовлетворяет функция, описывающая поперечное распределение поля  $H_{my}(x)$ .

3. Используя соотношения, полученные в предыдущей задаче 2, найдите распределение поля  $H_{my}(x)$  в  $\text{TM}$ -моду для пленочного планарного волновода. Нормалью к поверхности волновода является ось  $x$ , а свет распространяется вдоль оси  $z$ . Волновод состоит из диэлектрической пленки с толщиной  $h$  и показателем преломления  $n_0$ , нанесенной напылением на подложку с показателем преломления  $n_1 < n_0$ . Покровная среда имеет показатель преломления  $n_2 < n_0$ .

Выведите дисперсионное уравнение, запишите выражения для  $H_{my}(x)$  в волноводном слое, подложке и покровной среде.

4. Для пленочного планарного волновода из  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  с показателем преломления  $n_0 = 2,08$ , нанесенного на стеклянную подложку с показателем преломления  $n_1 = 1,51$ , определите минимально необходимую толщину волноводного слоя, поддерживающего распространение мод  $\text{TE}_0 - \text{TE}_4$ , возбуждаемых излучением с длиной волны 532 нм. Покровной средой в данной структуре является воздух.

5. Для пленочного планарного волновода из  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  с показателем преломления  $n_0 = 2,08$ , нанесенного на подложку из кварцевого стекла с показателем преломления  $n_1 = 1,51$ , определите минимально необходимую толщину волноводного слоя, поддерживающего распространение мод  $\text{TM}_0 - \text{TM}_2$ , возбуждаемых излучением с длиной волны 1064 нм. Покровной средой в данной структуре является воздух.

## 16.7 Нелинейная оптика

### 16.7.1 Примеры решения задач по теме «Нелинейная оптика»

**Задача 1.** Для волны накачки с частотой  $\omega$ , имеющей обыкновенную поляризацию и распространяющейся под углом  $\theta$  к оси  $z$  в плоскости  $XZ$  кристалла ниобата лития, найдите все компоненты вектора наведенной электрической поляризации на частоте  $2\omega$ .

**Решение.** Напряженность электрического поля световой волны накачки с обыкновенной поляризацией в этом случае имеет вид

$$E_y^\omega(x, z, t) = \frac{1}{2} \dot{E}_{my}^\omega \exp\left\{i\left[\omega t - k_0 n_o^\omega (x \sin \theta + z \cos \theta)\right]\right\} + \text{к.с.}, \quad (7.1)$$

а вклад в наведенную электрическую поляризацию на частоте  $2\omega$  в ниобате лития дают только компоненты тензора нелинейной оптической восприимчивости  $d_{yyy} = d_{22}$  и  $d_{zyy} = d_{31}$ . Подставляя  $E_y^\omega(x, z, t)$  в общее выражение для наведенной электрической поляризации

$$P_i = \varepsilon_0 \left( \chi_{ij} E_j + 2d_{ijk} E_j E_k + 4\chi_{ijkl} E_j E_k E_l + \dots \right), \quad (7.2)$$

в результате получаем

$$\begin{aligned} P_x^{2\omega} &= 0, \\ P_y^{2\omega} &= \varepsilon_0 d_{22} \left\{ \frac{1}{2} \left( \dot{E}_{my}^\omega \right)^2 \exp\left\{i\left[2\omega t - 2k_0 n_o^\omega (x \sin \theta + z \cos \theta)\right]\right\} + \text{к.с.} \right\}, \\ P_z^{2\omega} &= \varepsilon_0 d_{31} \left\{ \frac{1}{2} \left( \dot{E}_{my}^\omega \right)^2 \exp\left\{i\left[2\omega t - 2k_0 n_o^\omega (x \sin \theta + z \cos \theta)\right]\right\} + \text{к.с.} \right\} \end{aligned} \quad (7.3)$$

**Ответ:**

$$\begin{aligned} P_x^{2\omega} &= 0, \\ P_y^{2\omega} &= \varepsilon_0 d_{22} \left\{ \frac{1}{2} \left( \dot{E}_{my}^\omega \right)^2 \exp\left\{i\left[2\omega t - 2k_0 n_o^\omega (x \sin \theta + z \cos \theta)\right]\right\} + \text{к.с.} \right\}, \\ P_z^{2\omega} &= \varepsilon_0 d_{31} \left\{ \frac{1}{2} \left( \dot{E}_{my}^\omega \right)^2 \exp\left\{i\left[2\omega t - 2k_0 n_o^\omega (x \sin \theta + z \cos \theta)\right]\right\} + \text{к.с.} \right\}. \end{aligned}$$

### 16.7.2 Варианты задач для самоподготовки

**1.** Для волны накачки с частотой  $\omega$ , имеющей обыкновенную поляризацию и распространяющейся под углом  $\theta$  к оси  $z$  в плоскости  $YZ$  кристалла ниобата лития, найдите все компоненты вектора наведенной электрической поляризации на частоте  $2\omega$ .

**2.** Для волны накачки с частотой  $\omega$ , имеющей обыкновенную поляризацию и распространяющейся вдоль оси  $x$  кристалла ниобата лития, найдите все компоненты вектора наведенной электрической поляризации на частоте  $2\omega$ .

**3.** Для волны накачки с частотой  $\omega$ , имеющей обыкновенную поляризацию и распространяющейся вдоль оси  $y$  кристалла ниобата лития, найдите все компоненты вектора наведенной электрической поляризации на частоте  $2\omega$ .

**4.** Для волны накачки с частотой  $\omega$ , имеющей необыкновенную поляризацию и распространяющейся вдоль оси  $x$  кристалла ниобата лития, найдите все компоненты вектора наведенной электрической поляризации на частоте  $2\omega$ .

**5.** Для волны накачки с частотой  $\omega$ , имеющей необыкновенную поляризацию и распространяющейся вдоль оси  $y$  кристалла ниобата лития, найдите все компоненты вектора наведенной электрической поляризации на частоте  $2\omega$ .

6. Для волны накачки с частотой  $\omega$ , имеющей обыкновенную поляризацию и распространяющейся вдоль оси  $y$  кристалла нитрида галлия (класс симметрии  $6mm$ ), найдите все компоненты вектора наведенной электрической поляризации на частоте  $2\omega$ .

7. Для волны накачки с частотой  $\omega$ , имеющей необыкновенную поляризацию и распространяющейся вдоль оси  $x$  кристалла нитрида галлия (класс симметрии  $6mm$ ), найдите все компоненты вектора наведенной электрической поляризации на частоте  $2\omega$ .

8. Для волн с частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , имеющих необыкновенную поляризацию и распространяющихся вдоль оси  $x$  кристалла ниобата лития, найдите все компоненты вектора наведенной электрической поляризации на суммарной частоте.

9. Для волн с частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , имеющих обыкновенную поляризацию и распространяющихся вдоль оси  $y$  кристалла ниобата лития, найдите все компоненты вектора наведенной электрической поляризации на разностной частоте.

10. Для волны накачки с частотой  $\omega$ , имеющей обыкновенную поляризацию и распространяющейся под углом  $45^\circ$  к оси  $x$  кристалла дигидрофосфата калия (класс симметрии  $\bar{4}2m$ ), найдите все компоненты вектора наведенной электрической поляризации на частоте  $2\omega$ .

11. Для генерации второй гармоники в ниобате лития конгруэнтного состава излучением накачки с обыкновенной поляризацией и длиной волны 1064 нм найдите ориентацию кристалла относительно его кристаллографических осей, при которой для распространяющихся вдоль нормали к входной грани световых волн условия синхронизма будут выполняться точно.

Показатели преломления ниобата лития:  $n_o = 2,24614$  и  $n_e = 2,16256$  на длине волны 1064 нм;  $n_o = 2,32802$  и  $n_e = 2,23148$  на длине волны 532 нм.

## 17 Подготовка к контрольной работе

Студенты выполняют две письменные контрольные работы. Контрольные работы проводятся по следующим темам:

1. Электромагнитные колебания и волны.
2. Дифракция света. Оптика анизотропных сред.

При выполнении контрольной работы каждому студенту выдается билет с вопросом по теоретической части и с одной задачей, выбранной из предложенных задач для самостоятельного решения (задачи представлены выше в разделе 16).

### 17.1 Теоретические вопросы для письменной контрольной работы по теме «Электромагнитные колебания и волны»

1. Как можно описать математически гармоническое колебание? Какими параметрами характеризуется гармоническое колебание?

2. 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.

3. Запишите дифференциальное уравнение, описывающее одномерный линейный осциллятор. Каково его общее решение?

4. Из каких соотношений можно получить уравнение, описывающее свободные колебания заряда в последовательном колебательном контуре?

5. Какой временной зависимостью описываются свободные колебания заряда в последовательном колебательном контуре? Изобразите график данной зависимости.

6. Каким образом можно получить дифференциальное уравнение, описывающее вынужденные колебания в механической системе? Запишите соответствующее дифференциальное уравнение и поясните все обозначения.

7. Дайте определения понятиям «фазовая плоскость», «изображающая точка», «фазовая траектория». Поясните ответ рисунком.

8. Как можно получить уравнение фазовых траекторий для свободных колебаний в системе с одной степенью свободы?

9. Как найти нелинейную электрическую поляризацию среды при воздействии на неё двух монохроматических полей с различными частотами? На каких частотах она будет проявляться при учете нелинейных явлений второго порядка?

10. Запишите матрицу коэффициентов нелинейной оптической восприимчивости второго порядка для кристаллов симметрии  $3m$ .

11. Запишите волновое уравнение для среды с учетом наводимой в ней световыми волнами нелинейной электрической поляризации. Поясните все обозначения.

12. Запишите уравнение фазовых траекторий для свободных колебаний в системе с одной степенью свободы и поясните на его основе особенности движения изображающей точки по фазовой траектории во времени.

13. Нарисуйте фазовый портрет гармонических колебаний и дайте ему физическую трактовку.

14. Нарисуйте фазовый портрет системы с мнимыми собственными частотами и дайте ему физическую трактовку.

15. Нарисуйте фазовый портрет затухающих колебаний и дайте ему физическую трактовку.

16. Нарисуйте фазовый портрет нарастающих колебаний и дайте ему физическую трактовку.

17. Запишите уравнения Максвелла в дифференциальной форме. Поясните все обозначения.

18. Выведите волновое уравнение из уравнений Максвелла в дифференциальной форме для непроводящей изотропной среды, в которой отсутствуют свободные заряды и сторонние токи.

19. Запишите математическую формулировку одномерного волнового уравнения. Поясните все обозначения.

20. Дайте определение понятию фазового или волнового фронта волны.

21. Запишите математическое выражение для напряженности электрического поля плоской электромагнитной волны, распространяющейся в произвольном направлении. Поясните все обозначения.

22. Запишите уравнения Максвелла для плоских гармонических волн в непроводящей среде, в которой также отсутствуют свободные заряды и сторонние токи. Поясните все обозначения.

23. Какое поле называют поляризованным, а какое неполяризованным?

24. Чем отличаются волны с линейной, эллиптической и круговой (левой и правой) поляризациями?

25. Запишите математическое выражение для волнового сопротивления среды, поясните все обозначения. Чему равно волновое сопротивление вакуума как среды распространения?

26. Запишите математическое выражение для фазовой скорости света через материальные параметры среды распространения, а также через скорость света в вакууме и коэффициент преломления. Поясните все обозначения.

27. В чем состоит достоинство комплексного метода при описании гармонических плоских волн?

## 17.2 Теоретические вопросы для письменной контрольной работы по темам «Дифракция света. Оптика анизотропных сред»

1. В чем заключается явление дифракции электромагнитных (световых) волн?
2. Сформулируйте граничные условия Кирхгофа.
3. Запишите интеграл Френеля – Кирхгофа для случая дифракции на отверстии в непрозрачном экране.
4. Сформулируйте принцип Гюйгенса – Френеля.
5. В чем заключаются дифракционные приближения Френеля?
6. В чем заключаются дифракционные приближения Фраунгофера?
7. Нарисуйте распределение интенсивности в дифракционной картине Фраунгофера на прямоугольном отверстии.
8. Чем отличаются дифракционные картины для круглого и прямоугольного отверстий?
9. Как преобразуются лазерные пучки с гауссовым профилем при распространении в свободном пространстве?
10. Как преобразуется лазерный пучок с гауссовым профилем тонкой линзой?
11. Опишите возможную реализацию амплитудной дифракционной решетки.
12. Запишите математическое выражение для условия главных максимумов интенсивности, наблюдаемых при использовании дифракционной решетки.
13. Какова зависимость угловой дисперсии дифракционной решетки от порядка дифракционного максимума?
14. Тензорами какого ранга описываются диэлектрическая и магнитная проницаемости и проводимость среды?
15. Как можно записать тензор второго ранга для кубических кристаллов?
16. Какой вид имеет тензор второго ранга в одноосных кристаллах?
17. С каким явлением связана дисперсия диэлектрической проницаемости прозрачных сред на оптических частотах?
18. С чем связано явление пространственной дисперсии диэлектрической проницаемости прозрачных сред на оптических частотах?
19. Каковы характерные особенности распространения плоских световых волн в оптически неактивных изотропных средах?
20. В чем заключается явление естественной оптической активности при распространении световых волн в гиротропных оптически изотропных средах?
21. Что такое *циркулярное двулучепреломление*?
22. Каковы свойства *собственных (нормальных) волн среды*?
23. Чем отличаются друг от друга *обыкновенные и необыкновенные световые волны* в одноосных кристаллах?
24. Как ориентирован вектор поляризации обыкновенной световой волны в одноосном кристалле?
25. Как ориентирован вектор поляризации необыкновенной световой волны в одноосном кристалле?
26. В чем суть явления «линейный электрооптический эффект Поккельса»? В каких кристаллах он наблюдается?
27. В чем суть явления «квадратичный электрооптический эффект Керра»?
28. В чем суть явления «фотоупругий эффект»? Тензором какого ранга он описывается?
29. В чем суть явления «эффект Фарадея»?

## Заключение

В итоге изучения тем студент должен твердо знать ответы, как минимум, на следующие вопросы.

1. Гармоническое колебание: математическое выражение и параметры (амплитуда, частота, фаза, период, начальная фаза).
2. Запишите дифференциальное уравнение для линейного осциллятора и его общее решение.
3. Запишите уравнение свободных колебаний для заряда  $q$  на емкости в последовательном колебательном контуре; нарисуйте примерную временную зависимость  $q(t)$ .
4. Нарисуйте фазовый портрет гармонических колебаний.
5. Нарисуйте фазовый портрет системы с мнимыми собственными частотами; приведите пример такой системы.
6. Нарисуйте фазовый портрет затухающих колебаний.
7. Нарисуйте фазовый портрет нарастающих колебаний.
8. Запишите уравнения Максвелла в дифференциальной форме; поясните все обозначения.
9. Запишите материальные уравнения для векторов поля и плотности тока; поясните все обозначения.
10. Запишите граничные условия для векторов электрического и магнитного поля; поясните все обозначения.
11. Запишите волновое уравнение для немагнитной, непроводящей и безграничной среды.
12. Запишите одномерное волновое уравнение.
13. Дайте определение фазового (волнового) фронта.
14. Запишите выражение для плоской монохроматической волны, распространяющейся в произвольном направлении.
15. Запишите в комплексной форме выражение для напряженности электрического поля в электромагнитной плоской волне.
16. Как связаны между собой амплитуды напряженности электрического и магнитного полей в плоской волне?
17. Ориентация какого вектора в пространстве характеризует поляризацию плоских электромагнитных волн?
18. Что представляет собой плоская электромагнитная волна, поляризованная линейно?
19. Что представляет собой плоская электромагнитная волна с левой круговой поляризацией?
20. Как ориентирован вектор Пойнтинга в плоской электромагнитной волне относительно волнового вектора и векторов электрического и магнитного поля?
21. Запишите выражение для комплексного вектора Пойнтинга гармонического электромагнитного поля.
22. Поясните, почему амплитуда сферической электромагнитной волны обратно пропорциональна расстоянию от источника излучения.
23. Что такое угол Брюстера?
24. Что такое полное внутреннее отражение?
25. По какому закону изменяется поле электромагнитной волны в оптически менее плотной среде при полном внутреннем отражении?
26. Нарисуйте зависимость интенсивности света от координаты в интерференционной картине при её контрасте  $m = 1$ .
27. Дайте определение когерентности электромагнитных волн.
28. Дайте определение времени когерентности; поясните, чему равна длина когерентности.

29. Какую геометрическую фигуру представляет собой волновой фронт плоской электромагнитной волны?
30. Какую геометрическую фигуру представляет собой волновой фронт сферической электромагнитной волны?
31. Какие физические приемники излучения используются в объективных фотометрах?
32. Запишите выражение, описывающее закон Снеллиуса, и поясните все обозначения.
33. Как вводится коэффициент отражения и коэффициент прохождения света для плоских монохроматических волн?
34. Какие явления характеризуют модуль и фаза коэффициента отражения?
35. Как реализуется интерференционная картина в виде полос равной толщины?
36. Как можно получить интерференционную картину в виде полос равного наклона?
37. Поясните, каким способом можно просветлять оптические элементы.
38. Опишите схему интерферометра Майкельсона. Как с помощью него можно измерить длину когерентности источника излучения?
39. Опишите принцип измерения показателей преломления газообразных и жидких веществ с помощью интерферометра Маха-Цендера.
40. Сформулируйте принцип Гюйгенса – Френеля.
41. Нарисуйте распределение интенсивности в дифракционной картине Фраунгофера на прямоугольном отверстии.
42. Тензорами какого ранга описываются диэлектрическая и магнитная проницаемости и проводимость среды?
43. В чем заключается явление естественной оптической активности при распространении световых волн в гиротропных оптически изотропных средах?
44. Чем отличаются друг от друга обыкновенные и необыкновенные световые волны в одноосных кристаллах?
45. В чем суть явления «линейный электрооптический эффект Поккельса»? В каких кристаллах он наблюдается?
46. В чем суть явления «фотоупругий эффект»? Тензором какого ранга он описывается?
47. В чем суть явления «эффект Фарадея»?
48. Для какой цели используется опорная волна при записи голограммы?
49. Какова оптическая схема записи отражательной объемной голограммы по методу Ю.Н. Денисюка?
50. Что представляет собой спекл-структура оптического изображения, и каковы физические причины её возникновения?
51. Что такое огибающая волнового пакета?
52. Какую дисперсию среды называют нормальной?
53. Какую дисперсию среды называют аномальной?
54. Нарисуйте картину распространения света в оптическом волноводе в приближении геометрической оптики.
55. Что такое полоса непрозрачности периодической структуры?
56. Как выглядит индикатриса рассеяния линейно поляризованного света в случае рассеяния Рэлея?
57. Какие физические явления обуславливают комбинационное рассеяние света?
58. Запишите условия синхронизма для генерации волны суммарной частоты в нелинейной среде. Поясните их физический смысл; расшифруйте все обозначения.
59. Поясните, как можно реализовать фазовый синхронизм при генерации второй гармоники в оптически отрицательном одноосном кристалле.
60. Опишите физические явления, позволяющие реализовать распространение светлого пространственного солитона в нелинейной среде.
61. Какие подходы используются для создания сверхсильных световых полей?
62. Какой закон сохранения отражает правило частот Бора?

63. Как ширина энергетического уровня связана с временем жизни частицы на данном уровне?
64. Каков закон распределения частиц по энергетическим уровням в состоянии термодинамического равновесия?
65. Какие типы квантовых переходов между энергетическими уровнями могут происходить?
66. Каковы особенности индуцированного излучения?
67. В чем заключается принцип квантового усиления электромагнитных волн?

### Список рекомендуемой литературы

1. Стрелков С.П. Введение в теорию колебаний. – М.: Наука, 1964. – 440 с.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. - М.: Наука, 1970. – 855 с.
3. Введение в интегральную оптику / Под ред. М. Барноски; пер. с англ. под ред. Т.А. Шмаонова. – М.: Мир, 1977. – 367 с.
4. Франсон М. Оптика спеклов: Пер. с англ. – М.: Мир, 1980. – 171 с.
5. Матвеев А.Н. Оптика: Учеб. пособие для физ. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1985. – 351 с.
6. Бакут П.А. 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.
7. Ярив А. Оптические волны в кристаллах / А. Ярив, П. Юх. – М.: Мир, 1987. – 616 с.
8. Шен И.Р. Принципы нелинейной оптики. – М.: Мир, 1989. – 557 с.
9. Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн. – М.: Наука, 1992. – 454 с.
10. Ахманов С.А., Никитин С.Ю. Физическая оптика. – М.: Изд-во МГУ, 1998. – 626 с.
11. Информационная оптика / Под ред. Н.Н. Евтихеева. Учебное пособие – М., Издательство МЭИ, 2000. – 516 с.
12. Пихтин А.Н. Оптическая и квантовая электроника. Учебник для ВУЗов.- М.: Высшая школа, 2001. – 574 с.
13. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. 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.
14. Стафеев С.К., Боярский К.К., Башнина Г.Л. Основы оптики: Учебное пособие. – СПб.: Питер, 2006. – 336 с.
15. Розеншер Э. Оптоэлектроника : Пер. с фр. / Э. Розеншер, Б. Винтер ; ред. пер. О. Н. Ермаков. - М. : Техносфера, 2006. – 588 с.
16. Звелто О. Принципы лазеров / О. Звелто. – СПб.: Лань, 2008. – 720 с.
17. Никоноров Н.В., Шандаров С.М. Волноводная фотоника: Учебное пособие. – СПб.: Издательство СПбГУ ИТМО, 2008 – 142 с.
18. Дубнищев, Ю. Н. Колебания и волны: учебное пособие / Ю. Н. Дубнищев. – 2-е изд., перераб. – Санкт-Петербург: Лань, 2011. – 384 с., [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) (Дата обращения: 06.05.2024)
19. 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> (Дата обращения: 06.05.2024)
20. Шандаров В.М. Основы физической и квантовой оптики: учеб. пособие / В.М. Шандаров; Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012. – 197 с., <https://edu.tusur.ru/publications/750> (Дата обращения: 06.05.2024)
21. 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> (Дата обращения: 06.05.2024)

22. 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> (Дата обращения: 06.05.2024)

23. Калитеевский, Н. И. Волновая оптика : учебное пособие / Н. И. Калитеевский. – 5-е изд. – Санкт-Петербург : Лань, 2022. – 480 с., <https://e.lanbook.com/book/210113> (Дата обращения: 06.05.2024)