

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

Кафедра электронных приборов

## **ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КВАНТОВОЙ И ОПТИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**

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

2012

## **Шандаров, Станислав Михайлович**

Физические основы квантовой и оптической электроники: методические указания к практическим занятиям и по самостоятельной работе для студентов направления «Фотоника и оптоинформатика» / С.М. Шандаров; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра электронных приборов. - Томск : ТУСУР, 2012. – 47 с.

Целью преподавания дисциплины «Физические основы квантовой и оптической электроники» является подготовка бакалавров к разработке, эксплуатации и исследованию приборов и устройств квантовой и оптической электроники и фотоники на основе изучения студентами базовых физических принципов функционирования основных элементов квантовой и оптической электроники.

Предназначено для студентов очной и заочной форм, обучающихся по направлению «Фотоника и оптоинформатика» по курсу «Физические основы квантовой и оптической электроники».

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

Кафедра электронных приборов

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

## **ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КВАНТОВОЙ И ОПТИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**

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

Разработчик  
докт. физ.-мат. наук, проф.  
каф.ЭП  
\_\_\_\_\_ С.М. Шандаров  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г.

## Содержание

Введение.....	7
Раздел 1 Введение .....	7
1.1 Содержание раздела.....	7
1.2 Методические указания по изучению раздела.....	7
Раздел 2 Описание электромагнитного излучения оптического диапазона .....	8
2.1 Содержание раздела.....	8
2.2 Методические указания по изучению раздела.....	8
2.3 Вопросы для самопроверки .....	8
Раздел 3 Описание квантовых ансамблей и процессов релаксации .....	9
3.1 Содержание раздела.....	9
3.2 Методические указания по изучению раздела.....	9
3.3 Вопросы для самопроверки .....	9
Раздел 4 Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом .....	10
4.1 Содержание раздела.....	10
4.2 Методические указания по изучению раздела.....	10
4.3 Вопросы для самопроверки .....	10
Раздел 5 Общие вопросы построения лазеров .....	11
5.1 Содержание раздела.....	11
5.2 Методические указания по изучению раздела.....	11
5.3 Вопросы для самопроверки .....	12
Раздел 6 Твердотельные лазеры .....	12
6.1 Содержание раздела.....	12
6.2 Методические указания по изучению раздела.....	13
6.3 Вопросы для самопроверки .....	13
Раздел 7 Газовые и жидкостные лазеры .....	13
7.1 Содержание раздела.....	13
7.2 Методические указания по изучению раздела.....	14
7.3 Вопросы для самопроверки .....	14
Раздел 8 Полупроводниковые лазеры.....	14
8.1 Содержание раздела.....	14
8.2 Методические указания по изучению раздела.....	14

8.3 Вопросы для самопроверки .....	15
Раздел 9 Физические принципы волноводной фотоники и волоконной оптики.....	15
9.1 Содержание раздела.....	15
9.2 Методические указания по изучению раздела.....	15
9.3 Вопросы для самопроверки .....	16
Раздел 10 Планарные волноводы.....	16
10.1 Содержание раздела.....	16
10.2 Методические указания по изучению раздела.....	16
10.3 Вопросы для самопроверки .....	17
Раздел 11 Полосковые волноводы.....	17
11.1 Содержание раздела.....	17
11.2 Методические указания по изучению раздела.....	17
11.3 Вопросы для самопроверки .....	17
Раздел 12 Модуляция оптического излучения.....	18
12.1 Содержание раздела.....	18
12.2 Методические указания по изучению раздела.....	18
12.3 Вопросы для самопроверки .....	18
13 Темы практических занятий.....	19
13.1 Уравнения Максвелла. Плоские световые волны в безграничных средах.....	19
13.1.1 Примеры решения задач по теме «Уравнения Максвелла. Плоские световые волны в безграничных средах» .....	19
13.1.2 Варианты задач для самоподготовки.....	20
13.2 Описание квантовых ансамблей и процессов релаксации.....	22
13.2.1 Примеры решения задач по теме «Описание квантовых ансамблей и процессов релаксации» .....	22
13.2.2 Варианты задач для самоподготовки.....	22
13.3 Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом.....	24
13.3.1 Примеры решения задач по теме «Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом» .....	24
13.3.2 Варианты задач для самоподготовки.....	25
13.4 Оптические резонаторы .....	25
13.4.1 Примеры решения задач по теме «Оптические резонаторы» .....	25

13.4.2	Варианты задач для самоподготовки.....	27
13.5	Характеристики лазерного излучения. Уширение спектральных линий .....	27
13.5.1	Примеры решения задач по теме «Характеристики лазерного излучения. Уширение спектральных линий» .....	27
13.5.2	Варианты задач для самоподготовки.....	29
13.6	Твердотельные, газовые и полупроводниковые лазеры.....	31
13.6.1	Примеры решения задач по теме «Твердотельные, газовые и полупроводниковые лазеры» .....	31
13.6.2	Варианты задач для самоподготовки.....	31
13.7	Планарные оптические волноводы.....	32
13.7.1	Примеры решения задач по теме «Планарные оптические волноводы» .....	32
13.7.2	Варианты задач для самоподготовки.....	34
14	Темы для самостоятельного изучения .....	35
15	Подготовка к контрольной работе.....	35
15.1	Теоретические вопросы для письменной контрольной работы по темам «Принцип квантового усиления электромагнитных волн. Описание электромагнитного излучения оптического диапазона. Описание квантовых ансамблей и процессов релаксации. Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом».....	35
15.2	Теоретические вопросы для письменной контрольной работы по темам «Общие вопросы построения лазеров. Твердотельные лазеры. Газовые лазеры» .....	38
15.3	Теоретические вопросы для письменной контрольной работы по темам «Физические принципы интегральной оптоэлектроники и волоконной оптики. Планарные волноводы» .....	41
	Заключение .....	43
	Рекомендуемая литература .....	45

## **Введение**

Целью преподавания дисциплины «Физические основы квантовой и оптической электроники» является подготовка бакалавров к разработке, эксплуатации и исследованию приборов и устройств квантовой и оптической электроники и фотоники на основе изучения студентами базовых физических принципов функционирования основных элементов квантовой и оптической электроники.

Задачей дисциплины «Физические основы квантовой и оптической электроники» является изучение основных методов и приемов реализации устройств и приборов квантовой и оптической электроники и фотоники, рассмотрение конкретных устройств, методов их расчета и проектирования.

Изучение данной дисциплины базируется на знаниях, полученных студентами по дисциплинам:

1. «Физика» (термодинамика и молекулярная физика, электричество и магнетизм, колебаний и волны, оптика, квантовая физика).

2. «Оптическая физика» (уравнения Максвелла, дифракция света, оптика неоднородных сред, оптика анизотропных сред, нелинейная оптика, основы квантовой оптики).

3. «Основы фотоники» (источники сплошного и линейчатого спектра, приемники излучения).

«Физика твердого тела» (симметрия структуры и свойств твердых тел, колебания решеток и неупорядоченных структур, электронные возбуждения в твердых телах и их оптические свойства, дефекты в кристаллах).

### **Раздел 1 Введение**

#### **1.1 Содержание раздела**

Предмет дисциплины и ее задачи. Связь дисциплины с другими разделами физики и электроники. Принцип квантового усиления электромагнитных волн.

#### **1.2 Методические указания по изучению раздела**

При изучении раздела «Введение» следует обратить внимание на основные понятия и определения, на особенности квантовой электроники, оптоэлектроники, фотоники и интегральной оптики.

## **Раздел 2 Описание электромагнитного излучения оптического диапазона**

### **2.1 Содержание раздела**

Уравнения Максвелла в дифференциальной форме, материальные уравнения и граничные условия. Волновое уравнение для немагнитной безграничной среды. Одномерное волновое уравнение, плоские скалярные волны, гармонические волны. Плоская волна, распространяющаяся в произвольном направлении. Электромагнитные плоские волны. Поляризация плоских электромагнитных волн. Закон сохранения энергии для электромагнитного поля, вектор Пойнтинга. Распространение волновых пакетов\*. Групповая скорость\*.

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

При изучении раздела «Описание электромагнитного излучения оптического диапазона» следует обратить внимание на подходы к описанию электромагнитных волн и к выводу волновых уравнений, на электромагнитные плоские волны и виды поляризации плоских электромагнитных волн, на уравнение баланса энергии электромагнитных волн и вектор Пойнтинга.

### **2.3 Вопросы для самопроверки**

1. Дайте определение понятию фазового или волнового фронта волны.
2. Запишите материальные уравнения для изотропной среды, не обладающей дисперсией. Поясните все обозначения.
3. Запишите уравнения Максвелла в дифференциальной форме. Поясните все обозначения.
4. Выведите волновое уравнение из уравнений Максвелла в дифференциальной форме для непроводящей изотропной среды, в которой отсутствуют свободные заряды и сторонние токи.
5. Запишите математическую формулировку одномерного волнового уравнения. Поясните все обозначения.
6. Запишите математическое выражение для напряженности электрического поля плоской электромагнитной волны, распространяющейся в произвольном направлении. Поясните все обозначения.
7. Запишите уравнения Максвелла для плоских гармонических волн в непроводящей среде, в которой также отсутствуют свободные заряды и сторонние токи. Поясните все обозначения.



8. Какое поле называют поляризованным, а какое неполяризованным?

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

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

11. 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.

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

### **Раздел 3 Описание квантовых ансамблей и процессов релаксации**

#### **3.1 Содержание раздела**

Смешанные и чистые ансамбли. Матрица плотности. Термостатированный ансамбль. Безызлучательные переходы. Описание релаксации. Общие уравнения для матрицы плотности.

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

При изучении раздела «Описание квантовых ансамблей и процессов релаксации» следует обратить внимание на энергетические состояния квантовых систем, описание термостатированного ансамбля, безызлучательные переходы, описание релаксации, уравнения для матрицы плотности.

#### **3.3 Вопросы для самопроверки**

1. Каков физический смысл диагональных элементов матрицы плотности?

2. Каков физический смысл недиагональных элементов матрицы плотности? Чему они равны в стационарном состоянии?

3. Запишите математическое выражение для среднего по ансамблю значения некоторой физической величины, считая матрицу плотности данного ансамбля известной. Поясните все обозначения.

4. Запишите математическую формулировку для уравнения движения матрицы плотности смешанного ансамбля. Поясните все обозначения.

5. Какая система частиц называется термостатированным ансамблем? Приведите пример термостатированного ансамбля.

6. Что такое релаксация для термостатированного ансамбля?

7. Запишите уравнение движения для недиагонального элемента матрицы плотности термостатированного ансамбля. Поясните все обозначения.

8. Запишите уравнение движения для диагонального элемента матрицы плотности термостатированного ансамбля. Поясните все обозначения.

9. В чем заключается принцип детального равновесия при тепловых переходах?

10. Что такое тепловые (безызлучательные) переходы?

## **Раздел 4    Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом**

### **4.1 Содержание раздела**

Электрические и магнитные дипольные моменты и энергия взаимодействия микрочастиц с внешним полем. Двухуровневая система частиц во внешнем поле: основные уравнения; вероятности индуцированных переходов. Анализ поглощения электромагнитного поля двухуровневой системой, эффект насыщения. Спонтанные переходы. Балансные уравнения.

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

При изучении раздела «Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом» следует обратить внимание на физические явления, позволяющие электромагнитному полю взаимодействовать с микрочастицами; на применение уравнений для матрицы плотности для описания взаимодействия квантовых макросистем с внешним полем; на особенности индуцированных и спонтанных переходов; на эффект насыщения поглощения и на возможность использования балансных уравнений для энергетических расчетов.

### **4.3 Вопросы для самопроверки**

1. В чем суть полуклассического описания при рассмотрении электродипольного взаимодействия микрочастиц с электромагнитным полем?

2. Чему равны диагональные матричные элементы оператора электродипольного момента? Поясните свой ответ.

3. Запишите полную систему уравнений, которая позволяет описать взаимодействие электромагнитного поля с двухуровневой системой частиц. Поясните все обозначения.

4. Запишите математическое выражение, описывающее частотную зависимость вероятности индуцированного перехода для двухуровневой системы, взаимодействующей с внешним электромагнитным полем с частотой, близкой к частоте квантового перехода. Поясните все обозначения.

5. Запишите уравнение, описывающее динамику диагонального элемента матрицы плотности  $\rho_{11}$  двухуровневой системы, взаимодействующей с внешним полем, с учетом индуцированных и тепловых переходов. Поясните все обозначения.

6. Запишите выражение для мощности, поглощаемой двухуровневой системой частиц, взаимодействующей с внешним полем, с учетом эффекта насыщения. Поясните все обозначения.

7. Запишите выражение для мощности, поглощаемой двухуровневой системой частиц, взаимодействующей с внешним полем, в приближении слабого поля. Поясните все обозначения.

8. Запишите выражение для мощности, поглощаемой двухуровневой системой частиц, взаимодействующей с внешним полем, в приближении сильного поля. Поясните все обозначения.

9. В чем заключается эффект насыщения при взаимодействии двухуровневой системы частиц с внешним электромагнитным полем?

10. Запишите математическое выражение для вероятности спонтанного перехода через коэффициент Эйнштейна. Поясните все обозначения.

11. Запишите балансное (кинетическое) уравнение для числа частиц на энергетическом уровне. Поясните все обозначения.

## **Раздел 5 Общие вопросы построения лазеров**

### **5.1 Содержание раздела**

Особенности оптического диапазона. Элементарная теория открытых оптических резонаторов. Добротность резонаторов. Волновая теория открытых резонаторов. Классификация оптических резонаторов. Селекция типов колебаний в оптических резонаторах. Характеристики лазерного излучения. Уширение спектральных линий.

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

При изучении раздела «Общие вопросы построения лазеров» следует обратить внимание на особенности оптических резонаторов,

способы повышения добротности резонаторов, волновую теорию открытых резонаторов, селекцию типов колебаний в оптических резонаторах, монохроматичность, временную и пространственную когерентность лазерного излучения, фокусировку и коллимацию лазерных пучков.

### 5.3 Вопросы для самопроверки

1. Выведите выражение для собственной частоты продольной моды резонатора Фабри-Перо.
2. Опишите способы селекции поперечных мод в оптических резонаторах.
  1. Опишите способы селекции продольных мод в оптических резонаторах.
  2. Дайте определение одночастотному режиму генерации лазера.
  3. Что такое длина когерентности? Какова длина когерентности различных источников излучения?
  4. Дайте определение понятия когерентности.
  3. Нарисуйте картину распределения светового поля на зеркале оптического резонатора для лазера, генерирующего моду  $TEM_{11q}$ .
  4. Что собой представляет полуконфокальный оптический резонатор? Каковы его достоинства?
  5. Выведите выражение для добротности оптического резонатора с учетом только полезных потерь, на связь с нагрузкой.
  6. По каким причинам свойство временной когерентности лазерного излучения очень важно для голографии?
  7. Для какой из поперечных мод расходимость лазерного пучка минимальна? Каково распределение амплитуды и фазы по сечению такого пучка, каков угол его расходимости?
  8. За счет каких процессов происходит однородное уширение спектральной линии излучения активного вещества?
  9. За счет чего происходит неоднородное уширение спектральной линии излучения активного вещества?
  10. Каким образом можно уменьшить расходимость лазерного пучка?

## Раздел 6 Твердотельные лазеры

### 6.1 Содержание раздела

Схемы функционирования твердотельных лазеров. Системы накачки твердотельных лазеров\*. Балансные уравнения и режим непрерывной генерации в твердотельных лазерах. Режим свободной генерации. Лазеры с

модуляцией добротности резонатора. Синхронизация продольных мод и генерация ультракоротких импульсов.

## **6.2 Методические указания по изучению раздела**

При изучении раздела «Твердотельные лазеры» следует обратить внимание на особенности твердотельных лазеров, трехуровневую и четырехуровневую схемы реализации инверсии населенностей, описание режимов непрерывной генерации, свободной генерации и модуляции добротности на основе балансных уравнений, а также на режим синхронизации продольных мод.

## **6.3 Вопросы для самопроверки**

1. Нарисуйте схему уровней и переходов между ними для твердотельных лазеров при трехуровневой схеме достижения инверсии населенностей.
2. Нарисуйте схему уровней и переходов между ними для твердотельных лазеров при четырехуровневой схеме достижения инверсии населенностей.
3. Каковы преимущества лазеров, функционирующих по четырехуровневой схеме?
4. Какие элементы содержит ламповая система накачки твердотельных лазеров?
5. Какие источники излучения накачки обеспечивают максимальный КПД твердотельных лазеров?
6. Запишите балансные уравнения для режима непрерывной генерации в твердотельных лазерах.
7. Какие два режима могут быть реализованы в твердотельных лазерах при непрерывной накачке?
8. Опишите режим свободной генерации в твердотельных лазерах.
9. Опишите принцип действия лазера с модулированной добротностью резонатора.
10. Как можно реализовать в лазере режим синхронизации продольных мод?

## **Раздел 7 Газовые и жидкостные лазеры**

### **7.1 Содержание раздела**

Особенности газов как активного вещества для лазеров. Механизмы возбуждения газоразрядных лазеров. Атомарный гелий-неоновый лазер. Ионный аргоновый лазер. Молекулярный лазер на углекислом газе. Жидкостные лазеры на растворах органических красителей\*.

## 7.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Газовые и жидкостные лазеры» следует обратить внимание на достоинства газовых и жидкостных лазеров; на способы достижения состояния инверсии населенностей в газоразрядных лазерах; на особенности молекулярных лазеров, позволяющих обеспечить высокий КПД.

## 7.3 Вопросы для самопроверки

1. Перечислите особенности газов, как активного вещества для лазеров.
2. Перечислите способы реализации инверсии населенностей в газах.
3. Назовите основные процессы, создающие инверсию населенностей в газовом разряде.
4. Что такое столкновения 1-го рода?
5. Что такое столкновения 2-го рода?
6. Как реализуется инверсия населенностей в газоразрядных лазерах на самоограниченных переходах?
7. Нарисуйте схему энергетических уровней для газов гелия и неона, используемых в гелий-неоновом лазере.
8. Чем обусловлено ограничение поперечных размеров газоразрядной трубки для гелий-неонового лазера?
9. Для чего в газоразрядных трубках используются выходные окна, скошенные под углом Брюстера к оси оптического резонатора?
10. Как создается инверсия населенностей в ионном аргоновом лазере?
11. Какие колебательные состояния реализуются в молекуле углекислого газа?
12. Какой газ используется в качестве вспомогательного в газоразрядном молекулярном лазере на  $\text{CO}_2$ ?

## Раздел 8 Полупроводниковые лазеры

### 8.1 Содержание раздела

Оптические свойства полупроводников. Полупроводниковые лазеры с оптической накачкой. Возбуждение полупроводников быстрыми электронами\*. Гетероструктуры для инжекционных лазеров. Инжекционные лазеры на гомо- и гетеропереходах.

### 8.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Полупроводниковые лазеры» следует обратить внимание на структуру энергетических зон в собственных

полупроводниках, гомоструктурах и гетероструктурах и на способы создания инверсии населенностей оптической накачкой, электронным пучком и инжекцией носителей заряда в гомо- и гетероструктурах.

### 8.3 Вопросы для самопроверки

1. Нарисуйте энергетическую диаграмму для собственного полупроводника при температуре абсолютного нуля.
2. Нарисуйте энергетическую диаграмму для полупроводника с электронной проводимостью при температуре абсолютного нуля.
3. Нарисуйте энергетическую диаграмму для полупроводника с дырочной проводимостью при температуре абсолютного нуля.
4. Как изменится положение квазиуровня Ферми при воздействии на собственный полупроводник оптическим излучением с энергией квантов, превосходящей ширину запрещенной зоны?
5. Нарисуйте энергетическую диаграмму для гомоструктурного *p-n* перехода при температуре абсолютного нуля, в отсутствие приложенного напряжения.
6. Нарисуйте энергетическую диаграмму для гомоструктурного *p-n* перехода при температуре абсолютного нуля, для прямого смещения.
7. Почему гетероструктуры GaAs/GaAlAs являются подходящими для создания инжекционных лазеров?
8. Нарисуйте энергетическую диаграмму для двойной гетероструктуры при прямом смещении.
9. Чем определяется рабочая длина волны полупроводникового лазера?

## Раздел 9 Физические принципы волноводной фотоники и волоконной оптики

### 9.1 Содержание раздела

Волноводное распространение света в диэлектрических структурах, призмный ввод излучения, планарные линзы, электрооптическая и акустооптическая модуляция, интегральные фотоприемные устройства\*, интегральные инжекционные гетеролазеры.

### 9.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Физические принципы волноводной фотоники и волоконной оптики» следует обратить внимание на явление полного внутреннего отражения, туннельный ввод излучения в оптические волноводы и физические эффекты, позволяющие реализовать устройства волноводной фотоники различного назначения.

### 9.3 Вопросы для самопроверки

1. Нарисуйте картину распространения света в оптическом волноводе в приближении геометрической оптики.
2. Поясните условия, при которых наблюдается явление полного внутреннего отражения на плоской границе раздела двух диэлектрических сред.
3. Как реализуется призмный ввод излучения в оптический волновод?
4. Каким образом параллельный световой пучок, распространяющийся по планарному оптическому волноводу, фокусируется геодезической линзой?
5. Как можно реализовать электрооптическую модуляцию оптического излучения в устройствах волноводной фотоники?
6. Как реализуется акустооптическая модуляция в планарных оптических волноводах?
7. Как можно реализовать фотоприемные устройства для волноводной фотоники?
8. Как реализуется инжекционный гетеролазер, который может быть интегрирован в устройства волноводной фотоники?

## Раздел 10 Планарные волноводы

### 10.1 Содержание раздела

Классификация оптических волноводов. Геометрическая оптика планарных волноводов: классификация мод, волноводные моды пленочных структур, дисперсионное уравнение, эффективная толщина, градиентные волноводы. Электромагнитная теория планарных волноводов: волновые уравнения для пленочных и градиентных структур\*, ТЕ- и ТМ-моды, распределение полей, ортогональность мод, эффективная толщина.

### 10.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Планарные волноводы» следует обратить внимание на методы геометрической оптики и электромагнитной теории, применяемых при анализе распространения волн в планарных волноводах, на структуру полей ТЕ- и ТМ-мод, на поперечное распределение полей в различных волноводных модах, на дискретный спектр волноводных мод и сплошной спектр излучательных мод.



### 10.3 Вопросы для самопроверки

1. В чем отличие полосковых волноводов от планарных?
2. Чем пленочные волноводы отличаются от градиентных? Какими технологическими методами формируются пленочные и градиентные волноводы?
3. Какие компоненты электрического и магнитного полей присутствуют в ТЕ-модах?
4. Какие компоненты электрического и магнитного полей присутствуют в ТМ-модах?
5. Какая лучевая картина соответствует излучательной моде подложки некоторой пленочной волноводной структуры?
6. Какие значения может принимать эффективный показатель преломления волноводной моды?
7. Какие значения может принимать эффективный показатель преломления излучательной моды?
8. Запишите волновое уравнение для ТЕ-мод.
9. Нарисуйте поперечное распределение поля  $E_y(x)$  для моды ТЕ<sub>2</sub>.
10. Что такое эффективная толщина волновода? Зависит ли она от номера моды?
11. По какому закону изменяется поле волноводной моды в пределах волноводного слоя планарного волновода?
12. По какому закону изменяется поле волноводной моды в оптически однородной покровной среде планарной структуры?

## Раздел 11 Полосковые волноводы

### 11.1 Содержание раздела

Типы полосковых волноводов и технология изготовления\*. Метод эффективного показателя преломления. Моды полосковых волноводов.

### 11.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Полосковые волноводы» следует обратить внимание на изложение метода эффективного показателя преломления.

### 11.3 Вопросы для самопроверки

1. Нарисуйте структуру внедренного полоскового волновода в поперечном сечении и укажите соотношения между показателями преломления используемых элементов и окружающей среды.
2. Нарисуйте структуру приподнятого полоскового волновода в поперечном сечении и укажите соотношения между показателями преломления используемых элементов и окружающей среды.

3. Для волновода гребенчатого типа нарисуйте его модель, используемую в методе эффективного показателя преломления.

4. Нарисуйте структуру электрического поля моды  $E_{11}^y$  в пленочном полосковом волноводе погруженного типа.

5. Нарисуйте структуру электрического поля моды  $E_{01}^x$  в пленочном полосковом волноводе погруженного типа.

6. Укажите технологические методы формирования полосковых волноводов.

## **Раздел 12 Модуляция оптического излучения**

### **12.1 Содержание раздела**

Описание электрооптического и фотоупругого эффектов. Электрооптическая модуляция оптического излучения в оптических волноводах. Акустооптические модуляторы и дефлекторы\*.

### **12.2 Методические указания по изучению раздела**

При изучении раздела «Модуляция оптического излучения» следует обратить внимание на механизмы изменения показателя преломления за счет электрооптического и акустооптического эффектов, а также на преимущества волноводных электрооптических модуляторов перед объемными аналогами.

### **12.3 Вопросы для самопроверки**

1. Какие оптические параметры кристалла без центра симметрии изменяются при приложении к нему низкочастотного электрического поля?

2. Какие оптические параметры среды изменяются при распространении в ней акустической волны?

3. Как можно реализовать фазовый волноводный электрооптический модулятор?

4. Как можно реализовать амплитудный волноводный электрооптический модулятор?

5. В чем состоят преимущества волноводных электрооптических модуляторов перед объемными аналогами?

6. Что такое полуволновое напряжение электрооптического модулятора?

7. Каким должно быть направление электрического поля в волноводном электрооптическом модуляторе на ниобате лития для достижения минимального полуволнового напряжения?

8. Как можно реализовать акустооптическую модуляцию в планарных оптических волноводных структурах?

9. Что такое угол Брэгга и как он связан с частотой акустической волны?

### 13 Темы практических занятий

На практических занятиях студенты рассматривают варианты задач. Целью занятий является углубление понимания процессов, происходящих при распространении световых волн в безграничных средах и волноводных структурах, при взаимодействии электромагнитного излучения с веществом, релаксации за счет взаимодействия с термостатом, генерации оптического излучения в лазерах, управлении характеристиками лазерного излучения. Уделяется внимание таким характеристикам лазерного излучения, как поляризация, монохроматичность, когерентность излучения; расходимость световых пучков.

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. Уравнения Максвелла. Плоские световые волны в безграничных средах.
2. Описание квантовых ансамблей и процессов релаксации.
3. Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом.
4. Оптические резонаторы.
5. Характеристики лазерного излучения. Уширение спектральных линий.
6. Твердотельные, газовые и полупроводниковые лазеры.
7. Планарные оптические волноводы.

#### 13.1 Уравнения Максвелла. Плоские световые волны в безграничных средах

##### 13.1.1 Примеры решения задач по теме «Уравнения Максвелла. Плоские световые волны в безграничных средах»

**Задача 1.** Из уравнений Максвелла в дифференциальной форме и материальных уравнений для изотропной непроводящей среды получить волновое уравнение для вектора электрической напряженности  $\vec{E}$ , считая свободные заряды отсутствующими.

**Решение.** Применяем операцию  $\text{rot}$  к уравнению

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t},$$

в котором предварительно делаем подстановку  $\vec{B} = \mu\vec{H}$ . После перестановки независимых операторов  $\text{rot}$  и  $\partial/\partial t$  получаем

$$\text{rotrot } \vec{E} = -\mu \frac{\partial}{\partial t} \text{rot } \vec{H}.$$

Используя далее уравнение

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{\delta}_{\text{compl}},$$

в котором с учетом условий задачи полагаем, что  $\vec{\delta}_{\text{compl}} = \vec{\delta}_{\text{disp}} + \vec{\delta}_{\text{extr}} = \partial\vec{D}/\partial t + \vec{\delta}_{\text{extr}} = \varepsilon\partial\vec{E}/\partial t + \vec{\delta}_{\text{extr}}$ , окончательно получаем

$$\text{rotrot } \vec{E} + \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = -\mu \frac{\partial \vec{\delta}_{\text{extr}}}{\partial t}.$$

**Ответ:**

$$\text{rotrot } \vec{E} + \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = -\mu \frac{\partial \vec{\delta}_{\text{extr}}}{\partial t}.$$

**Задача 2.** Плоская электромагнитная волна, распространяющаяся в среде с относительными проницаемостями  $\mu_r = 16$  и  $\varepsilon_r = 4$ , имеет амплитуду напряженности электрического поля  $E_m = 100$  мВ/м. Определите амплитуду напряженности магнитного поля для данной волны.

**Решение.** Используя соотношение для амплитуд напряженности электрического и магнитного полей  $H_m = E_m/W$ , где волновое сопротивление среды  $W = \sqrt{\mu/\varepsilon}$ ,  $\mu = \mu_r\mu_0$ ,  $\varepsilon = \varepsilon_r\varepsilon_0$ , а также используя известное значение  $W_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0} = 120\pi$  Ом, получаем  $H_m = 0,133$  мА/м.

**Ответ:**  $H_m = 0,133$  мА/м.

### 13.1.2 Варианты задач для самоподготовки

1. Расположенная при  $x=0$  бесконечно тонкая по оси  $x$  и имеющая бесконечно большие размеры по осям  $z$  и  $y$  диэлектрическая пленка имеет поверхностный электрический заряд с плотностью  $\xi = 20$  Кл/м<sup>2</sup>. Определите поле вектора электрической индукции, создаваемое данной пленкой в ближней и дальней полуплоскости.

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

3. 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.

4. Единичный вектор волновой нормали плоской волны равен  $\vec{n} = (\vec{i} + \vec{j})/\sqrt{2}$ . Что собой представляет фазовый фронт данной волны?

5. Световое излучение имеет длину волны 500 нм. Найдите волновое число данной волны при распространении в вакууме и в немагнитной среде с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r = 4$ .

6. 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.

7. Плоская электромагнитная волна, распространяющаяся в среде с относительными проницаемостями  $\mu_r = 8$  и  $\epsilon_r = 2$ , имеет амплитуду напряженности магнитного поля  $H_m = 1$  А/м. Определите амплитуду напряженности электрического поля для данной волны.

8. 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.

9. 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.

10. 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.

11. 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.

## 13.2 Описание квантовых ансамблей и процессов релаксации

### 13.2.1 Примеры решения задач по теме «Описание квантовых ансамблей и процессов релаксации»

**Задача 1.** В трехуровневой системе частиц с частотой перехода между уровнями  $\omega_{31} = 3kT/\hbar$  вероятность теплового перехода равна  $\Gamma_{31} = 20 \text{ с}^{-1}$ . Найдите вероятность теплового перехода  $\Gamma_{13}$ .

**Решение.** Из принципа детального равновесия следует соотношение

$$\Gamma_{nk} = \Gamma_{kn} \exp\left(\frac{E_n - E_k}{kT}\right),$$

где разность энергий частиц на уровнях можно выразить из постулата Бора:  $E_k - E_n = \hbar\omega_{kn}$ . Для частоты перехода  $\omega_{31}$ , заданной в условиях задачи, отсюда получаем  $\Gamma_{13} = 0,99 \text{ с}^{-1}$ .

**Ответ:**  $\Gamma_{13} = 0,99 \text{ с}^{-1}$ .

**Задача 2.** Для термостатированного ансамбля микрочастиц, имеющего два энергетических уровня и находящегося в состоянии релаксации, выведите уравнение, описывающее эволюцию диагонального элемента матрицы плотности  $\rho_{22}(t)$ .

**Решение.** Из уравнения движения для диагональных элементов матрицы плотности получаем

$$\frac{d\rho_{22}}{dt} = \Gamma_{12}\rho_{11} - \Gamma_{21}\rho_{22}.$$

В качестве второго уравнения, необходимое для получения замкнутой системы, для двухуровневого случая следует использовать следующее общее соотношение:  $\rho_{11} + \rho_{22} = 1$ . Выражая из последнего уравнения  $\rho_{11}$  и подставляя его в первое уравнение, окончательно получаем

$$\frac{d\rho_{22}}{dt} + (\Gamma_{12} + \Gamma_{21})\rho_{22} = \Gamma_{12}.$$

**Ответ:**

$$\frac{d\rho_{22}}{dt} + (\Gamma_{12} + \Gamma_{21})\rho_{22} = \Gamma_{12}.$$

### 13.2.2 Варианты задач для самоподготовки

1. Для трехуровневого ансамбля частиц, находящегося в стационарном состоянии, населенности уровней составили  $N_1 = 5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ ,  $N_2 = 3 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$  и  $N_3 = 2 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ . Найдите все элементы матрицы плотности данного ансамбля.

2. В двухуровневой системе частиц с частотой перехода между уровнями  $\omega_{21} = 2kT/\hbar$  вероятность теплового перехода равна  $\Gamma_{12} = 2 \text{ с}^{-1}$ . Найдите вероятность теплового перехода  $\Gamma_{21}$ .

3. Для термостатированного ансамбля, находящегося в состоянии релаксации, запишите уравнение, описывающее эволюцию недиагонального элемента  $\rho_{12}(t)$  и найдите его общее решение.

4. Для термостатированного ансамбля микрочастиц, имеющего два энергетических уровня и находящегося в состоянии релаксации, выведите уравнение, описывающее эволюцию диагонального элемента матрицы плотности  $\rho_{11}(t)$ .

5. В трехуровневой системе частиц с эквидистантным спектром частота перехода между соседними уровнями равна  $\omega_{mn} = kT/\hbar$ . Измеренные значения вероятностей тепловых переходов для одной частицы в единицу времени составляют  $\Gamma_{12} = 1 \text{ с}^{-1}$  и  $\Gamma_{31} = 10 \text{ с}^{-1}$ . Найдите вероятности переходов  $\Gamma_{21}$  и  $\Gamma_{13}$  с использованием принципа детального равновесия.

6. Термостатированный ансамбль частиц, имеющих три энергетических уровня, находится в состоянии релаксации. Используя общие уравнения для матрицы плотности и условие самосопряженности ее элементов  $\rho_{nm} = \rho_{mn}^*$ , выведите систему уравнений, полностью описывающую данный ансамбль.

7. В двухуровневой системе частиц с частотой перехода между уровнями  $\omega_{21} = kT/\hbar$  происходит релаксация к равновесному состоянию за счет взаимодействия с термостатом. Найдите закон, по которому уменьшается населенность второго уровня  $N_2(t)$ , если при  $t=0$  населенности уровней были одинаковы и составляли  $N_1(0) = N_2(0) = 0.5 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ . Вероятность теплового перехода  $\Gamma_{21} = 10 \text{ с}^{-1}$ .

8. Термостатированный ансамбль парамагнитных ионов  $\text{Cr}^{3+}$ , внедренных в решетку  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , имеет 4 эквидистантных уровня и находится в состоянии термодинамического равновесия. Найдите элементы матрицы плотности  $\bar{\rho}$  данного ансамбля, если частота перехода между соседними уровнями равна  $\omega_{mn} = kT/(100\hbar)$ ,  $m = n + 1$ .

9. Для трехуровневой системы частиц с эквидистантным спектром и частотой перехода между соседними уровнями  $\omega_{32} = \omega_{21} = kT/\hbar$ , находящейся в состоянии термодинамического равновесия, найдите населенности первого и второго уровней, если на третьем уровне находится  $10^{18}$  частиц.

10. В трехуровневой системе, находящейся в состоянии термодинамического равновесия, общая концентрация частиц имеет значение  $N_0 = 2,95 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$ , а частоты переходов между уровнями

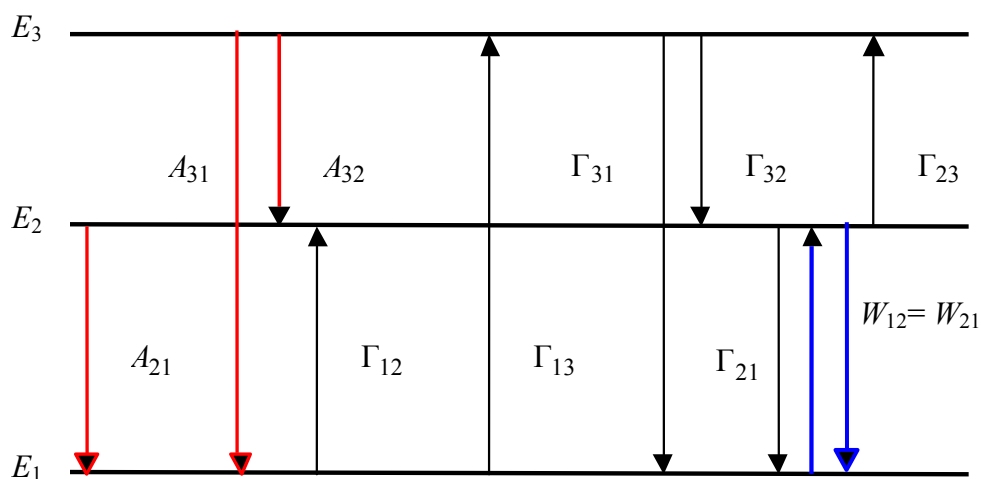
составляют  $\omega_{21} = 0,02kT/\hbar$  и  $\omega_{31} = 0,03kT/\hbar$ . Найдите концентрации частиц, находящихся на каждом из трех уровней.

### 13.3 Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом

#### 13.3.1 Примеры решения задач по теме «Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом»

**Задача 1.** Запишите балансное уравнение для числа частиц на уровне 1 трехуровневой системы с учетом воздействующего на нее электромагнитного поля, имеющего частоту  $\omega_{21}$ , и всех других возможных переходов.

Решение. Изобразим энергетическую диаграмму и схему возможных переходов на рисунке, обозначая, например, тепловые переходы черными стрелками, спонтанные – красными, и индуцированные – синими. Из рисунка видно, что изменение числа частиц на уровне 1 со временем характеризуется восемью процессами, из которых 5 дают положительный вклад и ещё 3 – отрицательный вклад в общий баланс.



В результате уравнение баланса для числа частиц на уровне 1 может быть получено из общего уравнения

$$\frac{dN_m}{dt} = \sum_{n \neq m} (\Gamma_{nm} N_n - \Gamma_{mn} N_m) + \sum_{n \neq m} W_{nm} (N_n - N_m) + \sum_{n \neq m} (A_{nm} N_n - A_{mn} N_m)$$

в следующем виде:

$$\frac{dN_1}{dt} = (\Gamma_{21} N_2 - \Gamma_{12} N_1) + (\Gamma_{31} N_3 - \Gamma_{13} N_1) + A_{21} N_2 + A_{31} N_3 + W_{12} (N_2 - N_1).$$

**Ответ:**

$$\frac{dN_1}{dt} = (\Gamma_{21} N_2 - \Gamma_{12} N_1) + (\Gamma_{31} N_3 - \Gamma_{13} N_1) + A_{21} N_2 + A_{31} N_3 + W_{12} (N_2 - N_1).$$



### 13.3.2 Варианты задач для самоподготовки

1. Для микрочастицы, имеющей два энергетических уровня, на каждом из которых она описывается четной волновой функцией, запишите матрицу оператора электродипольного момента.

2. В неравновесной четырехуровневой системе с энергиями частиц на уровнях  $E_1 = 0$  эВ,  $E_2 = 0,1$  эВ,  $E_3 = 1,1$  эВ и  $E_4 = 1,2$  эВ их населенности составляют  $N_1 = 1 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$ ,  $N_2 = 0,03 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$ ,  $N_3 = 0,5 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$  и  $N_4 = 1 \times 10^{16} \text{ м}^{-3}$ . Найдите длину волны светового излучения, которое будет усиливаться за счет индуцированных переходов между уровнями данной системы частиц.

3. Запишите балансное уравнение для числа частиц на верхнем уровне 3 трехуровневой системы с учетом воздействующего на нее электромагнитного поля, имеющего частоту  $\omega_{32}$ , и всех других возможных переходов.

4. Выведите систему уравнений баланса, соответствующую термостатированному ансамблю частиц с тремя энергетическими уровнями. Примите, что поле накачки индуцирует переходы между уровнями 1 и 3 с вероятностью  $W_{13}$  для одной частицы в единицу времени; учтите спонтанные переходы.

5. Для выведенной в задаче 4 системы балансных уравнений получите выражение для населенности основного уровня в стационарном состоянии. Из полученного выражения найдите формулу для населенности основного уровня при  $W_{13} \rightarrow \infty$ .

6. Запишите балансное уравнение для числа частиц на уровне 2 трехуровневой системы с учетом воздействующего на нее электромагнитного поля, имеющего частоту  $\omega_{21}$ , и всех других возможных переходов.

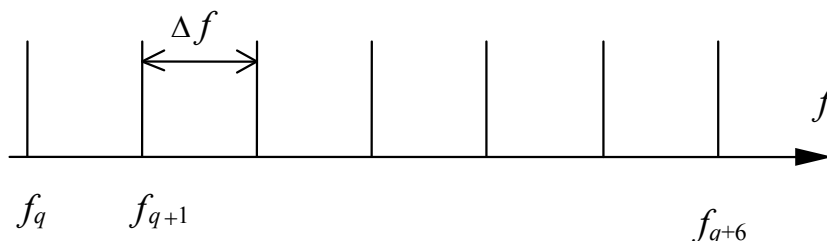
7. Из экспериментов по измерению частотной зависимости поглощения некоторым веществом получено, что она описывается кривой Лоренца, причем поглощаемая мощность на резонансной частоте составляет 10 мкВт, а на частоте, отличающейся от резонансной на 159 МГц, уменьшается до 5 мкВт. Определите время релаксации исследуемого вещества, соответствующее наблюдаемому резонансному переходу.

## 13.4 Оптические резонаторы

### 13.4.1 Примеры решения задач по теме «Оптические резонаторы»

**Задача 1.** Для оптического резонатора Фабри-Перо с расстоянием между зеркалами 0,5 м нарисуйте спектр собственных частот для семи генерируемых продольных мод и найдите его общую ширину в Гц.

**Решение.** По формуле  $\Delta f = c/(2L)$  находим, что межмодовый интервал равен 300 МГц. Спектр для семи генерируемых продольных мод изобразим на рисунке.



Общая ширина спектра генерации лазера определяется, как  $\delta f = f_{\max} - f_{\min}$ . В результате получаем  $\delta f = f_{q+6} - f_q = 6\Delta f = 1,8$  ГГц.

**Ответ:** Общая ширина спектра генерации лазера  $\delta f = 1,8$  ГГц.

**Задача 2.** Для трехзеркального кольцевого оптического резонатора с одинаковыми расстояниями  $l=50$  см между центрами зеркал, которые находятся в вершинах равностороннего треугольника, выведите выражение для собственных резонансных частот и определите расстояние между соседними модами в рад/с.

**Решение.** Время полного обхода резонатора гармонической световой волной (по часовой стрелке, или против часовой стрелки) равно  $t_{\text{pussby}} = 3l/c$ . За это время набег фазы волны, которая имеет частоту  $\omega$ , составит  $\varphi_{\text{pussby}} = \omega t_{\text{pussby}} = 3l\omega/c$ . Чтобы эта волна после возвращения в исходную точку не гасила, а поддерживала поле в этой точке, её набег фазы должен быть равен целому числу  $2\pi$ . Обозначая это целое число как  $q$ , и присваивая частоте такой резонансной волны его как индекс, в результате получаем  $\varphi_{\text{pussby}}^{\text{res. } q} = \omega_q t_{\text{pussby}} = 3l\omega_q/c = 2\pi q$ ,  $q = 1, 2, 3, \dots$ . Отсюда находим резонансную частоту, как

$$\omega_q = \frac{2\pi c}{3l} q, \quad q = 1, 2, 3, \dots,$$

и расстояние между соседними модами (межмодовый интервал), как

$$\Delta\omega = \omega_{q+1} - \omega_q = \frac{2\pi c}{3l}.$$

С использованием условий задачи, находим  $\Delta\omega = 12,57 \times 10^8$  рад/с.

**Ответ:** 1. Собственные частоты резонатора определяются выражением

$$\omega_q = \frac{2\pi c}{3l} q, \quad q = 1, 2, 3, \dots$$

2. Расстояние между соседними модами  $\Delta\omega = 12,57 \times 10^8$  рад/с.

### 13.4.2 Варианты задач для самоподготовки

1. Оптический резонатор кольцевого типа образован 4-мя зеркалами, находящимися на одинаковом расстоянии  $l = 25$  см друг от друга, если это расстояние измерять между центрами зеркал, которые находятся в вершинах квадрата. Определите полное время обхода световой волной резонатора, запишите выражение для собственных частот продольных мод и найдите межмодовый интервал между соседними модами по частоте в Гц.

2. Резонатор Фабри-Перо образован двумя зеркалами с коэффициентами отражения 80% и 50%, расположенными на расстоянии 1 м и имеющими поперечные размеры 5 мм. Вычислите добротность этого резонатора на длине волны 1 мкм, пренебрегая всеми потерями, кроме дифракционных и на связь с нагрузкой.

3. Для оптического резонатора Фабри-Перо с расстоянием между зеркалами 1,5 м нарисуйте спектр собственных частот для пяти генерируемых продольных мод и найдите его общую ширину в Гц.

4. Для активного вещества с шириной спектральной линии излучения 30 ГГц, помещенного в резонатор Фабри-Перо длиной 15 см, оцените примерное число генерируемых продольных мод.

5. Оптический резонатор состоит из расположенных на расстоянии 1 м друг от друга плоского зеркала, и сферического зеркала с радиусом кривизны 4 м. Какими дифракционными потерями, большими или малыми, обладает данный резонатор? Ответ поясните.

6. Оптический резонатор состоит из расположенных на расстоянии 1 м друг от друга сферических зеркал с радиусом кривизны 4 м. Какими дифракционными потерями, большими или малыми, обладает данный резонатор? Ответ поясните.

7. Для оптического резонатора, состоящего из плоского зеркала и сферического зеркала с радиусом кривизны 40 см, определите расстояние между зеркалами, при котором он будет полуконфокальным резонатором.

8. Нарисуйте примерное распределение поля на плоском выходном зеркале оптического резонатора для излучения, поляризованного вдоль оси  $x$  и соответствующего моде  $TEM_{31q}$ .

## 13.5 Характеристики лазерного излучения. Уширение спектральных линий

### 13.5.1 Примеры решения задач по теме «Характеристики лазерного излучения. Уширение спектральных линий»

**Задача 1.** Лазер генерирует в периодическом режиме импульсы с длительностью 100 пс и частотой повторения 100 МГц и имеет среднюю выходную мощность 1 Вт. Оцените для данного лазера мощность и энергию в импульсе генерации.

**Решение.** В течение одного периода колебаний  $T = 1/f_p$  лазером, имеющим выходную мощность  $P_{out}$ , генерируется излучение со средней энергией  $W_{mean} = T P_{mean} = P_{out}/f_p$ . Вся эта энергия сосредоточена в одном импульсе, потому энергия в импульсе для данного лазера  $W_p = W_{mean} = P_{out}/f_p = 10^{-8}$  Дж. Мощность в импульсе находим, как  $P_p = W_p/\tau_p = 100$  Вт.

**Ответ:** 1. Мощность лазера в импульсе  $P_p = 100$  Вт. 2. Энергия лазера в импульсе  $W_p = 10^{-8}$  Вт.

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

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

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

$$\begin{aligned} \vec{E}_1(\vec{r}, t) &= \vec{E}_{m1} \vec{k}^0 \exp\left\{i\left[\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} n(x \cos \theta + y \sin \theta)\right]\right\}, \\ \vec{E}_2(\vec{r}, t) &= \vec{E}_{m2} \vec{k}^0 \exp\left\{i\left[\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} n(x \cos \theta - y \sin \theta)\right]\right\}, \end{aligned}$$

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

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

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

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

где использованы обозначения  $I_{1,2} = |\dot{E}_{m1,m2}|^2 = E_{m1,m2}^2$  – интенсивности интерферирующих волн 1 и 2 и  $\Lambda = \lambda / (2n \sin \theta)$  – пространственный период интерференционной картины.

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

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

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

2. Пространственный период интерференционной картины  $\Lambda = 720$  нм.

3. Глубина модуляции интенсивности  $m = 0,198$ .

### 13.5.2 Варианты задач для самоподготовки

1. Для лазера с длиной резонатора 25 см, генерирующего три продольные моды, найдите время когерентности и длину когерентности выходного излучения.

2. Для лазера, генерирующего на основной поперечной моде пучок с длиной волны 1 мкм, апертурой 2 мм на выходном зеркале и мощностью 1 Вт, определите интенсивность излучения в сфокусированном пятне при фокусном расстоянии используемой линзы 100 мм.

3. Для лазера, генерирующего на основной поперечной моде пучок с длиной волны 0.5 мкм и апертурой 1 мм на выходном зеркале, сконструируйте линзовый коллиматор с короткофокусной линзой, имеющей фокусное расстояние 3 мм, для обеспечения дифракционной расходимости выходного излучения 100 мкрад. Ответ поясните рисунком.

4. Для лазера, генерирующего в периодическом режиме импульсы с энергией 0.01 Дж, длительностью 10 нс и частотой повторения 1 кГц, определите мощность в импульсе и среднюю мощность излучения.

5. Для He-Ne лазера с шириной спектральной линии вещества  $2\Delta f = 800$  МГц, имеющего длину оптического резонатора 50 см, определите максимальное и минимальное число генерируемых продольных мод и максимальное и минимальное значение длины когерентности. Поясните ответ на первый вопрос рисунком.

6. He-Ne лазер, имеющий длину оптического резонатора 75 см, генерирует 2 продольные моды. Определите для излучения данного лазера степень монохроматичности, время когерентности и длину когерентности.

7. Две плоские световые волны с одинаковыми частотами  $\omega$ , начальными фазами  $\varphi_0 = 0$  и векторами поляризации вдоль оси  $y$  имеют волновые векторы  $\vec{k}_1$  и  $\vec{k}_2$ , составляющие углы  $\pm\theta$  с осью  $z$  в плоскости  $xz$ . Найдите распределение интенсивности в картине интерференции этих волн, имеющих амплитуды  $E_{1m}$  и  $E_{2m}$ , в среде с показателем преломления  $n_0$ , не обладающей магнитными свойствами ( $\mu = \mu_0$ ). Определите период интерференционной картины и глубину модуляции интенсивности  $m = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$ .

8. Для ансамбля изолированных микрочастиц, не взаимодействующих друг с другом и имеющих 3 энергетических уровня, вероятности спонтанных переходов для одной частица в единицу времени равны  $A_{31} = 6 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$  и  $A_{32} = 4 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$ . Запишите выражение для спектральной линии излучения при переходе частиц с третьего на второй уровень, найдите ширину этой линии излучения  $2\Delta f$  в Гц. Проиллюстрируйте форму спектральной линии излучения рисунком, отражающим частотную зависимость мощности спонтанного излучения для данного перехода.

9. Для лазерного пучка гауссовой формы с длиной волны 500 нм и апертурой 5 мм на выходном плоском зеркале определите размер освещенного пятна, создаваемого на расстоянии 10 км.

10. Для лазерного пучка гауссовой формы с длиной волны 600 нм и апертурой 0.6 мм на выходном плоском зеркале определите размер пятна в фокальной плоскости линзы с фокусным расстоянием 10 мм.

11. Полупроводниковый светодиод генерирует излучение со средней длиной волны 600 нм в спектральной области шириной  $\Delta\lambda = 20$  нм. Определите степень монохроматичности, время и длину когерентности излучения данного светодиода.

12. Лазерный пучок с мощностью 100 Вт, длиной волны 10 мкм, гауссовым распределением интенсивности и плоским фазовым фронтом на выходном зеркале, имеет апертуру 10 мм. Найдите создаваемую им

интенсивность в фокальной плоскости положительной линзы с фокусным расстоянием 200 мм.

### 13.6 Твердотельные, газовые и полупроводниковые лазеры

#### 13.6.1 Примеры решения задач по теме «Твердотельные, газовые и полупроводниковые лазеры»

**Задача 1.** Для инжекционного лазера на двойной гетероструктуре InGaAsP длина волны генерируемого излучения составляет 650 нм. Оцените ширину запрещенной зоны для той области гетероструктуры, в которой происходят индуцированные переходы при излучательной рекомбинации электронов и дырок.

**Решение.** Энергия излучаемого кванта при рекомбинации электронов из зоны проводимости с дырками в валентной зоне связана с шириной запрещенной зоны:  $\hbar\omega_{rad} \approx E_g$ . Энергия кванта в электрон-вольтах рассчитывается по длине волны излучения, выраженной в нанометрах, из соотношения:  $\hbar\omega_{rad} = 1236/\lambda$ . В результате получаем, что ширину запрещенной зоны для той области гетероструктуры, в которой происходят индуцированные переходы, можно оценить как  $E_g \approx 1,90$  эВ.

**Ответ:** Ширина запрещенной зоны  $E_g \approx 1,90$  эВ для области гетероструктуры, в которой происходят индуцированные переходы при излучательной рекомбинации электронов и дырок.

#### 13.6.2 Варианты задач для самоподготовки

1. Для лазера с длиной резонатора 15 см, генерирующего в режиме синхронизации 40 продольных мод, найдите длительность генерируемых ультракоротких импульсов и их период повторения.

2. Для газоразрядного лазера, в котором инверсия населенностей реализуется за счет столкновений 1-го рода, запишите балансные уравнения для числа частиц на 2-м энергетическом уровне.

3. Для полупроводникового лазера, имеющего длину оптического резонатора 200 мкм и показатель преломления  $n = 2,5$ , определите межмодовый интервал в Гц для продольных мод и число полувольт, укладывающихся вдоль оси резонатора, если длина волны генерируемого излучения равна 400 нм.

4. В молекулярном лазере на углекислом газе расстояние между соседними колебательными уровнями молекул азота, используемого в качестве вспомогательного газа, составляет 0,292 эВ. Оцените максимально возможные значения коэффициента полезного действия (кпд), в пренебрежение всеми возможными потерями, при генерации данного лазера на длинах волн 10,6 мкм и 9,4 мкм.

5. Ширина запрещенной зоны арсенида галлия составляет 1,370 эВ при температуре 300 К и 1,467 эВ при температуре жидкого азота (77 К). Определите длину волны излучения полупроводникового лазера на основе GaAs при данных температурах.

6. Для полупроводникового лазера на GaAs с оптической накачкой определите необходимые значения длины волны лазерного излучения накачки, учитывая, что ширина запрещенной зоны арсенида галлия составляет 1,370 эВ.

## 13.7 Планарные оптические волноводы

### 13.7.1 Примеры решения задач по теме «Планарные оптические волноводы»

**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:

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

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:

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

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

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



$$\nabla \times \vec{E} = -i\omega\mu_0\vec{H},$$

$$\nabla \times \vec{H} = i\omega\varepsilon_0\varepsilon_r\vec{E},$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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:

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

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

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

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

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

### 13.7.2 Варианты задач для самоподготовки

1. 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.

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

3. 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.

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

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

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

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

5. Используя соотношения, полученные в задаче 4, найдите распределение поля  $H_{my}(x)$  в  $\text{TM}$ -режиме 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.

## 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. Распространение волновых пакетов. Групповая скорость
  2. Спонтанные переходы
  3. Жидкостные лазеры на растворах органических красителей
  4. Системы накачки твердотельных лазеров
  5. Возбуждение полупроводников быстрыми электронами
  6. Интегральные фотоприемные устройства
  7. Волновые уравнения для градиентных структур
  8. Технология изготовления полосковых волноводов
  9. Акустооптические модуляторы и дефлекторы
- Студент защищает реферат по выбранной им теме.

## 15 Подготовка к контрольной работе

Студенты выполняют три письменные контрольных работы. Контрольные работы проводятся по следующим темам:

1. Принцип квантового усиления электромагнитных волн. Описание электромагнитного излучения оптического диапазона. Описание квантовых ансамблей и процессов релаксации. Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом.

2. Общие вопросы построения лазеров. Твердотельные лазеры. Газовые лазеры.

3. Физические принципы интегральной оптоэлектроники и волоконной оптики. Планарные волноводы.

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 13).

### **15.1 Теоретические вопросы для письменной контрольной работы по темам «Принцип квантового усиления электромагнитных волн. Описание электромагнитного излучения оптического диапазона. Описание квантовых ансамблей и процессов релаксации. Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом»**

1. Дайте математическую формулировку для закона распределения частиц по энергетическим уровням в состоянии термодинамического равновесия. Поясните все обозначения.

2. Поясните, почему для реализации принципа квантового усиления электромагнитных волн необходимо создать в веществе состояние инверсии населенностей.

3. Поясните, почему для реализации принципа квантового усиления электромагнитных волн необходимо использование индуцированного излучения.

4. Поясните, почему спонтанное излучение не может быть использовано для реализации принципа квантового усиления электромагнитных волн.

5. Дайте формулировку принципа квантового усиления электромагнитных волн.

6. Дайте формулировку понятия «смешанный ансамбль»

7. Каков физический смысл диагональных элементов матрицы плотности?

8. Каков физический смысл недиагональных элементов матрицы плотности? Чему они равны в стационарном состоянии?

9. Запишите математическое выражение для среднего по ансамблю значения некоторой физической величины. Поясните все обозначения.

10. Запишите математическую формулировку для уравнения движения матрицы плотности смешанного ансамбля. Поясните все обозначения.

11. Какая система частиц называется термостатированным ансамблем? Приведите пример термостатированного ансамбля.

12. Что такое релаксация для термостатированного ансамбля?

13. Запишите уравнение движения для недиагонального элемента матрицы плотности термостатированного ансамбля. Поясните все обозначения.

14. Запишите уравнение движения для диагонального элемента матрицы плотности термостатированного ансамбля. Поясните все обозначения.

15. В чем заключается принцип детального равновесия при тепловых переходах?

16. Что такое тепловые (безызлучательные) переходы?

17. Дайте определение понятию фазового или волнового фронта волны.

18. Запишите материальные уравнения для изотропной среды, не обладающей дисперсией. Поясните все обозначения.

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

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

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

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

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

24. Какое поле называют поляризованным, а какое неполяризованным?

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

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

27. 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.

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

29. Как математически можно описать волну с произвольным видом поляризации, распространяющуюся вдоль оси  $z$ ? Поясните используемые обозначения.

30. Дайте определение понятиям «волновой вектор» и «единичный вектор волновой нормали».

31. Что такое «мгновенное значение», «амплитуда» и «фаза» гармонической плоской волны?

32. Выразите длину волны через: а) волновое число; б) частоту в рад/с; в) частоту в Гц.

33. Запишите математическое выражение для напряженности электрического поля гармонической плоской волны, распространяющейся в направлении  $-z$ . Поясните все обозначения.

34. Используя принцип детального равновесия и закон Больцмана, выведите соотношение между вероятностями теплового перехода сверху вниз и снизу вверх.

35. Запишите общие уравнения движения для диагональных элементов матрицы плотности термостатированного ансамбля, взаимодействующего с внешним полем. Поясните все обозначения.

36. В чем суть полуклассического описания при рассмотрении электродипольного взаимодействия микрочастиц с электромагнитным полем?

37. Чему равны диагональные матричные элементы оператора электродипольного момента? Поясните свой ответ.

38. Запишите математическое выражение для оператора взаимодействия микрочастицы, обладающей электрическим дипольным

моментом, с внешним электромагнитным полем в полуклассическом приближении. Поясните все обозначения.

39. Запишите математическое выражение для оператора взаимодействия микрочастицы, обладающей магнитным дипольным моментом, с внешним электромагнитным полем в полуклассическом приближении. Поясните все обозначения.

40. Запишите полную систему уравнений, которая позволяет описать взаимодействие электромагнитного поля с двухуровневой системой частиц. Поясните все обозначения.

41. Запишите математическое выражение, описывающее частотную зависимость вероятности индуцированного перехода для двухуровневой системы, взаимодействующей с внешним электромагнитным полем с частотой, близкой к частоте квантового перехода. Поясните все обозначения.

42. Запишите уравнение, описывающее динамику диагонального элемента матрицы плотности  $\rho_{11}$  двухуровневой системы, взаимодействующей с внешним полем, с учетом индуцированных и тепловых переходов. Поясните все обозначения.

43. Запишите выражение для мощности, поглощаемой двухуровневой системой частиц, взаимодействующей с внешним полем, с учетом эффекта насыщения. Поясните все обозначения.

44. Запишите выражение для мощности, поглощаемой двухуровневой системой частиц, взаимодействующей с внешним полем, в приближении слабого поля. Поясните все обозначения.

45. Запишите выражение для мощности, поглощаемой двухуровневой системой частиц, взаимодействующей с внешним полем, в приближении сильного поля. Поясните все обозначения.

46. В чем заключается эффект насыщения при взаимодействии двухуровневой системы частиц с внешним электромагнитным полем?

47. Каковы основные свойства спонтанных переходов?

48. Запишите математическое выражение для вероятности спонтанного перехода через коэффициент Эйнштейна. Поясните все обозначения.

49. Запишите балансное (кинетическое) уравнение для числа частиц на энергетическом уровне. Поясните все обозначения.

## **15.2 Теоретические вопросы для письменной контрольной работы по темам «Общие вопросы построения лазеров. Твердотельные лазеры. Газовые лазеры»**

1. Выведите выражение для собственной частоты продольной моды резонатора Фабри-Перо.

2. Опишите способы селекции поперечных мод в оптических резонаторах.

3. Опишите способы селекции продольных мод в оптических резонаторах.
4. Дайте описание трехуровневой схемы накачки твердотельных лазеров.
5. Дайте описание четырехуровневой схемы накачки твердотельных лазеров.
6. Какие основные элементы содержит система накачки твердотельного лазера?
7. Дайте описание источников света, используемых для накачки твердотельных лазеров.
8. Дайте описание осветительных систем, используемых для накачки твердотельных лазеров некогерентным излучением.
9. Запишите балансные уравнения для разности населенностей и числа фотонов в резонаторе, для режима непрерывной генерации в твердотельных лазерах при трехуровневой схеме накачки. Поясните все обозначения.
10. Дайте определение одночастотного режима работы резонатора.
11. Запишите балансные уравнения для разности населенностей и числа фотонов в резонаторе, для режима непрерывной генерации в твердотельных лазерах при четырехуровневой схеме накачки. Поясните все обозначения.
12. Запишите уравнения для разности населенностей и числа фотонов в резонаторе, для режима непрерывной генерации в твердотельных лазерах при трехуровневой схеме накачки, *в стационарном случае*. Поясните все обозначения.
13. Запишите уравнения для разности населенностей и числа фотонов в резонаторе, для режима непрерывной генерации в твердотельных лазерах при четырехуровневой схеме накачки, *в стационарном случае*. Поясните все обозначения.
14. Запишите *стационарные решения* балансных уравнений для разности населенностей и числа фотонов в резонаторе, для режима непрерывной генерации в твердотельных лазерах при трехуровневой схеме накачки. Поясните все обозначения.
15. Опишите два режима, реализуемые в твердотельных лазерах при непрерывной накачке.
16. Запишите выражение для выходной мощности твердотельного лазера в режиме непрерывной генерации при трехуровневой схеме накачки. Поясните все обозначения.
17. Дайте краткую характеристику режима свободной генерации в твердотельных лазерах.
18. Какова динамика изменения разности населенностей и числа фотонов в резонаторе в режиме свободной генерации в твердотельных лазерах?
19. Каков принцип действия лазеров с модуляцией добротности резонатора?

20. Опишите способы реализации режима модуляции добротности резонатора в твердотельных лазерах.

21. К чему приводит жесткая связь между фазами колебаний генерируемых лазером продольных мод?

22. Дайте краткую характеристику режима генерации ультракоротких импульсов в лазерах с синхронизацией продольных мод.

23. Как может быть технически реализован режим синхронизации продольных мод и генерации ультракоротких импульсов в лазерах?

24. Каковы механизмы возбуждения газоразрядных лазеров?

25. Каким образом реализуются условия создания инверсии населенностей в газовых средах за счет столкновений 1-го рода в импульсном режиме накачки?

26. Каким образом достигается состояние инверсии населенностей в газоразрядных лазерах за счет столкновений 2-го рода?

27. Какие процессы используются в газоразрядном гелий-неоновом лазере для создания инверсии населенностей энергетических уровней?

28. Каковы особенности конструкции газоразрядного гелий-неонового лазера, имеющего линейную поляризацию выходного излучения?

29. Какие процессы используются в ионном аргоновом лазере для достижения инверсии населенностей?

30. Охарактеризуйте колебательные уровни молекул  $\text{CO}_2$  и соответствующие им колебательные состояния, используемые в газоразрядных лазерах на углекислом газе.

31. Нарисуйте схему уровней, используемых в молекулярных лазерах на углекислом газе, и поясните ее.

32. Какие процессы используются для достижения инверсии населенностей в лазерах на  $\text{CO}_2$  и почему такие лазеры имеют высокий коэффициент полезного действия?

33. Что такое длина когерентности? Какова длина когерентности различных источников излучения?

34. Дайте определение понятия когерентности.

35. Нарисуйте картину распределения светового поля на зеркале оптического резонатора для лазера, генерирующего моду  $TEM_{11q}$ .

36. Что собой представляет полуконфокальный оптический резонатор? Каковы его достоинства?

37. Выведите выражение для добротности оптического резонатора с учетом только полезных потерь, на связь с нагрузкой.

38. По каким причинам свойство временной когерентности лазерного излучения очень важно для голографии?

39. Для какой из поперечных мод расходимость лазерного пучка минимальна? Каково распределение амплитуды и фазы по сечению такого пучка, каков угол его расходимости?

40. Каким образом можно уменьшить расходимость лазерного пучка, соответствующего основной поперечной моде ?



41. Что такое естественная ширина спектральной линии?
42. Какие причины приводят к однородному уширению спектральных линий?
43. Какие причины приводят к неоднородному уширению спектральных линий?
44. Какое из условий принципа квантового усиления электромагнитных волн определяет большую длину когерентности лазерного излучения? С какими физическими явлениями это связано?
45. Какое из условий принципа квантового усиления электромагнитных волн определяет высокую пространственную когерентность лазерного излучения? С какими физическими явлениями это связано?
46. Запишите выражение для добротности оптического резонатора с учетом полезных и дифракционных потерь. Поясните все обозначения.

### **15.3 Теоретические вопросы для письменной контрольной работы по темам «Физические принципы интегральной оптоэлектроники и волоконной оптики. Планарные волноводы»**

1. Запишите выражения для электрического и магнитного полей волноводной моды тонкопленочного волновода, с точки зрения геометрической оптики. Поясните все обозначения.
2. Опишите физические принципы, на которых базируется волноводное распространение света в тонких диэлектрических слоях, в том числе градиентного типа.
3. Дайте описание *излучательной моды* тонкопленочного волновода.
4. Дайте описание *излучательной моды подложки* тонкопленочного волновода.
5. Дайте описание *волноводной моды* тонкопленочного волновода.
6. Как в устройствах интегральной оптоэлектроники можно реализовать планарную линзу?
7. Как в планарных устройствах интегральной оптоэлектроники можно реализовать фотодетектор?
8. Как в планарных устройствах интегральной оптоэлектроники можно реализовать инжекционный гетеролазер?
9. Дайте определения для планарного оптического волновода и для полоскового оптического волновода.
10. Каковы отличия в распространении света в пленочных и градиентных волноводах, с позиций геометрической оптики?
11. Дайте краткую характеристику поперечно-электрическим, поперечно-магнитным и гибридным модам планарного волновода.
12. Выведите *дисперсионное уравнение* для тонкопленочного волновода на основе подхода геометрической оптики.

13. Как выражается постоянная распространения волноводной моды через угол, под которым распространяется по зигзагообразному пути свет в тонкопленочном волноводе?

14. Запишите *дисперсионное уравнение* для тонкопленочного волновода. Поясните все обозначения.

15. Запишите выражение для «эффективного показателя преломления» волноводной моды и поясните его физический смысл. Поясните все обозначения.

16. В каких пределах изменяются эффективные показатели преломления для: а) волноводных мод; б) излучательных мод подложки; в) излучательных мод.

17. Запишите выражение для минимальной толщины пленочного волновода, при которой по нему может распространяться волноводная мода  $TE_0$ . Поясните все обозначения.

18. Запишите выражение для минимальной толщины пленочного волновода, при которой по нему может распространяться волноводная мода  $TM_1$ . Поясните все обозначения.

19. Запишите выражение для эффективной толщины пленочного волновода и дайте ее трактовку с позиций геометрической оптики. Все обозначения поясните.

20. Запишите дисперсионное уравнение для градиентного планарного волновода в ВКБ-приближении. Поясните все обозначения.

21. Для градиентного планарного волновода, чему равен показатель преломления волноводного слоя в точке поворота?

22. Исходя из уравнений Максвелла, запишите систему уравнений для составляющих светового поля распространяющейся вдоль оси  $z$  волноводной  $TE$ -моды планарного волновода, не ограниченного вдоль оси  $y$ .

23. Исходя из уравнений Максвелла, запишите систему уравнений для составляющих светового поля распространяющейся вдоль оси  $z$  волноводной  $TM$ -моды планарного волновода, не ограниченного вдоль оси  $y$ .

24. Для планарного волновода, не ограниченного по оси  $y$ , запишите волновое уравнение для  $TE$ -мод, распространяющихся вдоль оси  $z$ . Поясните все обозначения.

25. Для планарного волновода, не ограниченного по оси  $y$ , запишите волновое уравнение для  $TM$ -мод, распространяющихся вдоль оси  $z$ . Поясните все обозначения.

26. Запишите общие решения волнового уравнения для  $TE$ -мод, распространяющихся вдоль оси  $z$  планарного тонкопленочного волновода. Поясните все обозначения.

27. Запишите решения волнового уравнения для  $TE$ -мод, распространяющихся вдоль оси  $z$  планарного тонкопленочного волновода, с учетом условия конечности для светового поля. Поясните все обозначения.

28. Запишите дисперсионное уравнение для ТЕ-мод тонкопленочного волновода. Поясните все обозначения.

29. Запишите выражения для компонент  $E_y$  светового поля волноводной ТЕ-моды тонкопленочного волновода в подложке, волноводном слое и покровной среде. Поясните все обозначения.

30. Нарисуйте картину распределения компоненты светового поля  $E_y(x)$  для моды ТЕ<sub>0</sub> в планарном тонкопленочном волноводе. Поясните, по какому закону изменяется поле в подложке и в покровной среде.

31. Нарисуйте картину распределения компоненты светового поля  $E_y(x)$  для моды ТЕ<sub>1</sub> в планарном тонкопленочном волноводе. Поясните, по какому закону изменяется поле в подложке и в покровной среде.

32. Запишите условие ортонормировки для двух мод, распространяющихся в одном направлении в оптическом волноводе. Поясните все обозначения.

33. Как найти мощность, переносимую по планарному волноводу вдоль его оси  $z$ , модами ТЕ и ТМ?

34. Запишите выражение для мощности, переносимой по планарному волноводу единичной ширины, ТЕ-модой. Поясните все обозначения.

35. Запишите выражение для мощности, переносимой по планарному волноводу единичной ширины, ТМ-модой. Поясните все обозначения.

### Заключение

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

1. В чем заключается принцип квантового усиления электромагнитных волн?

2. Перечислите виды квантовых переходов между уровнями и опишите характерные особенности каждого вида переходов.

3. Выведите уравнения баланса для числа частиц, находящихся на верхнем энергетическом уровне в трехуровневой системе, при наличии поля накачки с частотой  $\omega_{31}$ , обеспечивающего вероятность индуцированного перехода  $W_{pump}$  для одной частицы в единицу времени.

4. Каковы значения диагональных элементов оператора электродипольного перехода  $p_{mm}$ ? Дайте пояснения результату с использованием соответствующего математического аппарата.

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

6. Каковы основные особенности поглощения электромагнитного поля двухуровневой системой частиц в режиме слабого поля?

7. В чем заключается эффект насыщения при взаимодействии электромагнитного поля с двухуровневой системой частиц? Каковы физические причины эффекта насыщения?

8. Запишите выражение для формы спектральной линии излучения (поглощения) вещества в случае однородного уширения.

9. Выведите выражение для собственных частот продольных мод резонатора Фабри-Перо. Найдите межмодовый интервал и выразите его в Гц.

10. Нарисуйте распределение поля на выходном зеркале лазера, генерирующего поперечную моду  $TEM_{21q}$ .

11. Какое поле называют поляризованным, а какое неполяризованным?

12. Каков физический смысл диагональных элементов матрицы плотности?

13. Каков физический смысл недиагональных элементов матрицы плотности? Чему они равны в стационарном состоянии?

14. Дайте определение времени когерентности и длины когерентности оптического излучения. Найдите длину когерентности лазера, генерирующего излучение в спектральной полосе 1 МГц.

15. Нарисуйте схему уровней и переходов между ними для лазера, работающего по трехуровневой схеме накачки. Поясните принципы получения генерации в таком лазере.

16. Нарисуйте схему уровней и переходов между ними для лазера, работающего по четырехуровневой схеме. Поясните принцип получения генерации в такой схеме.

17. Дайте описание основных механизмов создания инверсии населенностей в газоразрядных лазерах и основных требований, которым должны удовлетворять используемые газы.

18. Поясните механизм реализации состояния инверсии населенностей в газоразрядном He-Ne лазере.

19. Какие колебательные состояния молекул  $CO_2$  используются в соответствующем газоразрядном лазере? Какой газ используется в качестве вспомогательного, и почему?

20. Чем отличаются друг от друга планарные градиентные и пленочные волноводы? Нарисуйте траектории лучей для волноводных мод в таких волноводах и поясните наблюдаемые различия.

21. Нарисуйте картины хода лучей в планарном волноводе при возбуждении в нем излучательных мод, излучательных мод подложки и волноводных мод. Укажите условия, при которых тот или иной тип мод будет наблюдаться.

22. Нарисуйте примерный вид дисперсионных зависимостей для мод планарного пленочного волновода. Перечислите основные особенности дисперсионных зависимостей для волноводных мод.

23. Запишите в общем виде выражение для распределений электрического и магнитного полей в волноводной моде планарного

волновода при распространении её вдоль оси  $Z$  в структуре, не ограниченной по оси  $Y$ .

24. Нарисуйте распределение электрического поля в волноводной моде  $TE_2$  пленочного планарного волновода, при показателях преломления подложки  $n_1$  и  $n_2$ , удовлетворяющих условию  $n_1 > n_2$ . Каков закон изменения поля в этих средах?

### Рекомендуемая литература

1. Киселев Г. Л. Квантовая и оптическая электроника : Учебное пособие. 2 е изд., испр. и доп. – СПб.: Издательство «Лань», 2011. – 320 с.: ил. ISBN 978 5 8114 1114 6, [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_cid=25&pl1\\_id=627](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=627).

2. Игнатов А. Н. Оптоэлектроника и нанофотоника: Учебное пособие. – СПб.: Издательство «Лань», 2011. — 544 с.: ил. ISBN 978 5 8114 1136 8 [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_cid=25&pl1\\_id=684](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=684).

3. Введение в квантовую и оптическую электронику: учеб. пособие. - 2-е изд., испр. / С.М. Шандаров, А.И. Башкиров. – Томск: ТУСУР, 2012. – 98 с., <http://edu.tusur.ru/training/publications/1578>.

4. Основы физической и квантовой оптики: учеб. пособие / В.М. Шандаров; Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012. – 197 с. <http://edu.tusur.ru/training/publications/750>.

5. Верещагин И.К., Косяченко Л.А., Кокин С.М. Введение в оптоэлектронику: Учебное пособие для вузов. - М.: Высшая школа, 1991. - 191 с.

6. Информационная оптика / Под ред. Н.Н. Евтихеева. Учебное пособие – М., Издательство МЭИ, 2000. - 516 с.

7. Квасница М.С. Квантовые и оптоэлектронные приборы: Учебное пособие. – Томск: ТУСУР, Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2002.– 73 с.

8. Малышев В.А. Основы квантовой электроники и лазерной техники: Учебное пособие для вузов. - М.: Высшая школа, 2005. - 542 с.

9. Пихтин А.Н. Оптическая и квантовая электроника. Учебник для ВУЗов.- М.: Высшая школа, 2001. – 574 с.

10. Семенов А.С., Смирнов В.Л., Шмалько А.В. Интегральная оптика для систем передачи и обработки информации. - М.: Радио и связь, 1990. - 225 с.

11. Шандаров С.М., Башкиров А.И. Введение в квантовую и оптическую электронику. Учебное пособие. – Томск: ТУСУР, 2007. – 100 с.

12. Волноводная оптоэлектроника / под ред. Т. Тамира. – М.: Мир, 1991. – 575 с.

13. Ярив А. Оптические волны в кристаллах / А. Ярив, П. Юх. – М.: Мир, 1987. – 616 с.
14. Коваленко Е.С., Пуговкин А.В., Тихомиров А.А. Введение в квантовую электронику / Е.С. Коваленко, А.В. Пуговкин, А.А. Тихомиров. – Томск: Изд-во ТГУ, 1974. – 432 с.
15. Интегральная оптика / под ред. Т. Тамира. – М.: Мир, 1978. – 520 с.
16. Клэр Ж. Введение в интегральную оптику / Ж. Клэр. – М.: Сов. радио, 1980. - 104 с.
17. Крылов К.И. Основы лазерной техники / К.И. Крылов, В.Т. Прокопенко, В.А. Тарлыков. – Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1990. – 316 с.
18. Звелто О. Принципы лазеров / О. Звелто. – СПб.: Лань, 2008. – 720 с.
19. Хакен Г. Лазерная светодинамика / Г. Хакен ; пер. с англ. – М. : Мир, 1988. – 350 с.
20. Прикладная физическая оптика: Учебник для вузов/И.М. Нагибина, В.А. Москалев, Н.А. Полушкина, В.Л. Рудин. - М.: Высш. шк., 2002.
21. Калитеевский Н.И. Волновая оптика : Учеб. пособие. – СПб.: Издательство «Лань», 2006.
22. Никоноров Н.В., Шандаров С.М. Волноводная фотоника: Учебное пособие. – СПб.: Издательство СПбГУ ИТМО, 2008 – 142 с.

Учебное пособие

Шандаров С.М.

Физические основы квантовой и оптической электроники

Методические указания к практическим занятиям и по самостоятельной  
работе

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