

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

Кафедра электронных приборов

## **РАДИОФОТОНИКА**

Методические указания к практическим занятиям  
и по самостоятельной работе

2018

**Шандаров, Станислав Михайлович**

**Буримов, Николай Иванович**

Радиофотоника: методические указания к практическим занятиям и по самостоятельной работе / С.М. Шандаров, Н.И. Буримов; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра электронных приборов. – Томск : ТУСУР, 2018. – 34 с.

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов направлений подготовки «Фотоника и оптоинформатика» и «Электроника и наноэлектроника» и аспирантов по направлениям 03.06.01 – Физика и астрономия и 12.06.01 – Фотоника, приборостроение, оптические и биотехнические системы и технологии.

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

Кафедра электронных приборов

УТВЕРЖДАЮ  
Зав. кафедрой ЭП  
\_\_\_\_\_ С.М. Шандаров  
« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

## РАДИОФОТОНИКА

Методические указания к практическим занятиям  
и по самостоятельной работе

Разработчики

докт. физ.-мат. наук, зав.  
каф. ЭП  
\_\_\_\_\_ С.М. Шандаров  
« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

докт. физ.-мат. наук, проф.  
каф. ЭП  
\_\_\_\_\_ Н.И. Буримов  
« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

## Содержание

Введение.....	6
Раздел 1 Введение .....	6
1.1 Содержание раздела.....	6
1.2 Методические указания по изучению раздела.....	6
Раздел 2 Волоконные световоды, планарные и полосковые волноводы .....	6
2.1 Содержание раздела.....	6
2.2 Методические указания по изучению раздела.....	6
2.3 Вопросы для самопроверки.....	6
Раздел 3 Распространение модулированного оптического излучения в волоконных световодах .....	7
3.1 Содержание раздела.....	7
3.2 Методические указания по изучению раздела.....	7
3.3 Вопросы для самопроверки.....	7
Раздел 4 Лазеры для радиофотонных систем.....	8
4.1 Содержание раздела.....	8
4.2 Методические указания по изучению раздела.....	8
4.3 Вопросы для самопроверки .....	8
Раздел 5 Электрооптические модуляторы для радиофотонных систем.....	9
5.1 Содержание раздела.....	9
5.2 Методические указания по изучению раздела.....	10
5.3 Вопросы для самопроверки.....	10
Раздел 6 Фотодетекторы для радиофотонных систем.....	11
6.1 Содержание раздела.....	11
6.2 Методические указания по изучению раздела.....	11
6.3 Вопросы для самопроверки.....	11
Раздел 7 Применение и тенденции развития радиофотонных систем .....	12
7.1 Содержание раздела.....	12
7.2 Методические указания по изучению раздела.....	12
7.3 Вопросы для самопроверки.....	12
Раздел 8 Темы практических занятий .....	13
8.1 Волоконные световоды, планарные и полосковые волноводы.....	13

8.1.1 Примеры решения задач по теме «Волоконные световоды, планарные и полосковые волноводы» .....	13
8.1.2 Варианты задач для самоподготовки .....	14
8.2 Лазеры для радиофотонных систем .....	17
8.2.1 Примеры решения задач по теме «Лазеры для радиофотонных систем» .....	17
8.2.2 Варианты задач для самоподготовки .....	18
8.3 Электрооптические модуляторы для радиофотонных систем .....	20
8.3.1 Примеры решения задач по теме «Электрооптические модуляторы для радиофотонных систем» .....	20
8.3.2 Варианты задач для самоподготовки .....	22
9 Темы для самостоятельного изучения .....	23
10 Подготовка к контрольной работе .....	24
10.1 Теоретические вопросы для письменной контрольной работы по темам «Волоконные световоды, планарные и полосковые волноводы. Распространение модулированного оптического излучения в волоконных световодах. Лазеры для радиофотонных систем» .....	24
10.2 Теоретические вопросы для письменной контрольной работы по темам «Электрооптические модуляторы для радиофотонных систем. Фотодетекторы для радиофотонных систем. Применение и тенденции развития радиофотонных систем» .....	26
Тестовые вопросы .....	28
Рекомендуемая литература .....	32

## **Введение**

Данное учебно-методическое пособие предназначено для методического сопровождения практических занятий и самостоятельной работы студентов и аспирантов по дисциплине «Радиофотоника». Оно содержит методические указания по изучению разделов дисциплины и вопросы для самопроверки; темы практических занятий с примерами решения задач и вариантами задач для самоподготовки; перечень тем для самостоятельного изучения; темы двух контрольных работ с перечнем теоретических вопросов; тестовые вопросы и список рекомендуемой литературы.

### **Раздел 1 Введение**

#### **1.1 Содержание раздела**

Предмет дисциплины и ее задачи. Связь дисциплины с другими разделами физики и фотоники. История развития радиофотоники.

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

При изучении раздела «Введение» следует обратить внимание на основные принципы и подходы квантовой электроники, фотоники и интегральной оптики, используемые в радиофотонике.

### **Раздел 2 Волоконные световоды, планарные и полосковые волноводы**

#### **2.1 Содержание раздела**

Планарные и полосковые волноводы. Волоконные световоды для систем оптической связи и радиофотоники. Профили показателя преломления. Геометрическая оптика планарных волноводов и волоконных световодов. Электромагнитная теория планарных и полосковых волноводов и волоконных световодов круглого сечения. Моды планарных и полосковых волноводов и волоконных световодов.

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

При изучении раздела «Волоконные световоды» следует обратить внимание на описание явления полного внутреннего отражения световых волн, на подход к выводу волновых уравнений и моды, используемые в световодах для радиофотонных систем.

#### **2.3 Вопросы для самопроверки**

1. Дайте определение понятию «критический угол».

2. Сформулируйте условия существования направляемых мод в планарном волноводе и в волоконном световоде в приближениях геометрической оптики и в рамках электромагнитной теории.

3. Чем отличаются ТЕ- и ТМ-моды?

4. Чем отличаются оптические волноводные структуры со ступенчатым и с градиентным профилями показателя преломления?

5. Что означает понятие отсечки моды? Все ли моды имеют отсечку?

6. Чем определяется эффективная толщина волновода?

7. Что представляют собой гибридные моды цилиндрического световода?

8. Какие физические явления обусловлены дисперсией, присущей волоконным световодам?

9. Что определяет эффективный показатель преломления волноводной моды?

10. Какими физическими факторами обусловлены оптические потери в волоконных световодах?

### **Раздел 3 Распространение модулированного оптического излучения в волоконных световодах**

#### **3.1 Содержание раздела**

Наведенная электрическая поляризация. Двойное рэлеевское рассеяние. Фаза передаваемого радиочастотного сигнала. Хроматическая дисперсия. Вынужденное рассеяние Манделъштама – Бриллюэна. Вынужденное комбинационное рассеяние. Фазовая кросс-модуляция. Четырехволновое смешение. Поляризационные эффекты.

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

При изучении раздела «Распространение модулированного оптического излучения в волоконных световодах» следует обратить внимание на физические явления, определяющие ослабление несущего оптического излучения и искажения модулирующего радиочастотного сигнала в радиооптических системах.

#### **3.3 Вопросы для самопроверки**

1. Восприимчивость какого порядка описывает линейное распространение в волоконном световоде?

2. Восприимчивость какого порядка приводит к генерации второй гармоники?

3. Какие нелинейные эффекты в волоконных световодах определяются восприимчивостью третьего порядка?

4. К каким искажениям модулированного оптического излучения при его передаче по волоконному световоду приводит двойное рэлеевское рассеяние?

5. Какое внешнее воздействие на волоконный световод оказывает наибольшее влияние на стабильность фазы передаваемого модулирующего радиочастотного сигнала?

6. Что такое хроматическая дисперсия оптического волокна?

7. Какие физические явления приводят к вынужденному рассеянию Мандельштами-Бриллюэна?

8. К какому виду помех приводит вынужденное комбинационное рассеяние в многоканальных радиофотонных линиях?

9. Что такое фазовая кросс-модуляция?

10. Опишите нелинейные эффекты, которые могут наблюдаться в волоконных световодах за счет четырехволнового смешения.

11. Какие поляризационные эффекты могут наблюдаться в волоконных световодах радиофотонных систем?

## **Раздел 4 Лазеры для радиофотонных систем**

### **4.1 Содержание раздела**

Полупроводниковые инжекционные гетеролазеры на основе GaAlAs и InGaAsP. Конструктивное исполнение диодных лазеров. Двойная гетероструктура. Полосковые лазеры. Лазеры с распределенным брэгговским отражением. Токовая модуляция излучения полупроводниковых лазеров. Ввод излучения полоскового лазера в волоконный световод. Активирующие примеси для волоконных лазеров. Фотоиндуцированные брэгговские решетки показателя преломления в световодах. Схемы накачки активных световодов. Особенности волоконных световодов как усилительной среды.

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

При изучении раздела «Лазеры для радиофотонных систем» следует обратить внимание на особенности и характеристики лазеров для волоконно-оптических систем передачи информации, в том числе, на спектральные характеристики лазеров; на соответствующие требования к длине волны излучения накачки и на особенности схемы переходов между уровнями, обеспечивающей реализацию состояния инверсии населенностей, для волоконных лазеров.

### **4.3 Вопросы для самопроверки**

1. Каким образом можно задать длину волны излучения лазеров на основе твердых растворов GaAlAs и InGaAsP?



2. Каковы физические причины снижения порогового тока в лазерах на основе двойной гетероструктуры?

3. Нарисуйте схему расположения слоёв в полосковом лазере на основе двойной гетероструктуры.

4. Каковы особенности лазеров с распределенным брэгговским отражением?

5. Какие виды токовой модуляции реализуются в полупроводниковых инжекционных гетеролазерах?

6. Каковы особенности стыковки полосковых лазеров с одномодовыми волоконными световодами?

7. Какие материалы используются в качестве основы для лазерных волоконных световодов?

8. Какие химические элементы используются для создания активных волоконных световодов, позволяющих создать в них оптической накачкой состояние инверсии населенностей? Между уровнями какой оболочки примесных ионов необходимо инициировать для этого электронные переходы?

9. Какие источники оптического излучения используются для накачки волоконных лазеров?

10. Как можно реализовать зеркала в волоконных лазерах?

11. Как создаются волоконные брэгговские решетки? От каких параметров решетки зависит коэффициент отражения излучения?

12. Опишите переходы между уровнями примесных ионов, позволяющие реализовать состояние инверсии населенностей при трехуровневой схеме накачки.

13. Опишите переходы между уровнями примесных ионов, позволяющие реализовать состояние инверсии населенностей при четырехуровневой схеме накачки.

14. Опишите принцип действия волоконных лазеров, основанных на вынужденном комбинационном рассеянии.

15. В каком спектральном диапазоне может генерировать излучение волоконный лазер на основе световодов, легированных  $\text{Nd}^{3+}$ ?

16. Какое излучение накачки необходимо использовать для волоконного лазера на основе световодов, легированных  $\text{Nd}^{3+}$ ?

17. В каком спектральном диапазоне может генерировать излучение волоконный лазер на основе световодов, легированных  $\text{Er}^{3+}$ ?

18. Какое излучение накачки необходимо использовать для волоконного лазера на основе световодов, легированных  $\text{Er}^{3+}$ ?

## **Раздел 5 Электрооптические модуляторы для радиотонных систем**

### **5.1 Содержание раздела**

Тензорное описание электрооптического эффекта. Линейный электрооптический эффект. Кубические нецентросимметричные кристаллы. Кристаллы симметрии  $4mm$ ,  $3m$ ,  $mm2$ . Распространение

световых волн в среде при однородном внешнем поле. Фазовый электрооптический модулятор поперечного типа. Амплитудный электрооптический модулятор. Волноводные фазовые модуляторы. Интерферометрическая модуляция интенсивности в интегрально-оптических устройствах. Поляризационные преобразования в устройствах интегральной оптики. Оптические спектральные фильтры. Поляризационно-независимые модуляторы и переключатели. Волноводные электрооптические дефлекторы, переключатели и модуляторы брэгговского типа на периодически поляризованных доменных структурах.

## 5.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Электрооптические модуляторы для радиофотонных систем» следует обратить внимание на особенности волноводной реализации быстродействующих широкополосных электрооптических модуляторов для применения в устройствах радиофотоники.

## 5.3 Вопросы для самопроверки

1. В чем суть явления «линейный электрооптический эффект Поккельса»? В каких кристаллах он наблюдается?
2. Тензором какого ранга описывается линейный электрооптический эффект?
3. Какой вид имеет электрооптический тензор в кубических нецентросимметричных кристаллах?
4. Какой вид имеет электрооптический тензор в кристаллах симметрии  $4mm$ ?
5. Какой вид имеет электрооптический тензор в кристаллах симметрии  $3m$ ?
6. Какой вид имеет электрооптический тензор в кристаллах симметрии  $mm2$ ?
7. Каким образом в объемных электрооптических модуляторах создается однородное электрическое поле?
8. Какое напряжение в электрооптическом модуляторе называют полуволновым?
9. Нарисуйте схему реализации амплитудной электрооптической модуляции с использованием объемного кристалла ниобата лития.
10. Нарисуйте примерный вид амплитудной характеристики объемного электрооптического модулятора.
11. Нарисуйте конфигурацию электродов волноводных электрооптических модуляторов, использующих параллельную или перпендикулярную компоненту электрического поля по отношению к поверхности кристалла.

12. Нарисуйте конфигурацию полосковых волноводов и электродов, создающих электрическое поле, при которой реализуется интерферометрическая модуляция интенсивности светового излучения.

13. Поясните физические принципы, на которых основана волноводная электрооптическая модуляция брэгговского типа на периодически поляризованных доменных структурах.

## **Раздел 6 Фотодетекторы для радиотонных систем**

### **6.1 Содержание раздела**

Параметры и характеристики приемников оптического излучения. Внутренний фотоэффект в однородных полупроводниках. Фотодиодные приемники *p-n*-типа. Фотодиодный режим. Фотогальванический режим. Фотодиодные приемники *p-i-n*-типа. Шумы в оптических приемниках: дробовой, тепловой, фликкер-шум. Отношение сигнал/шум. Эффективность преобразования световой мощности в фотодетекторе. Современное состояние фотодетекторов высокой мощности.

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

При изучении раздела «Фотодетекторы для радиотонных систем» следует обратить внимание на особенности приемников *p-i-n*-типа, позволяющие реализовать детектирование сигналов в радиотонных системах, функционирующих на длинах волн от 1,0 до 1,6 мкм, на частотах модулирующего сигнала 10 ГГц и более.

### **6.3 Вопросы для самопроверки**

1. Что такое токовая монохроматическая чувствительность фотоприемника? В каких единицах она измеряется?

2. Какой спектральный диапазон фотоприемных устройств соответствует минимальным потерям в кварцевых волоконных световодах?

3. Как связаны между собой собственная постоянная времени фотоприемника и граничная частота модуляции?

4. Нарисуйте энергетическую диаграмму для собственного полупроводника при температуре абсолютного нуля и поясните условия генерации электронно-дырочных пар при поглощении фотона. Какой должна быть его энергия?

5. Нарисуйте энергетическую диаграмму для полупроводника донорного *n*-типа при температуре абсолютного нуля и поясните условия генерации электронно-дырочных пар и неравновесных электронов при поглощении фотонов.

6. Нарисуйте энергетическую диаграмму для полупроводника акцепторного *p*-типа при температуре абсолютного нуля и поясните

условия генерации электронно-дырочных пар и неравновесных дырок при поглощении фотонов.

7. Какое напряжение, прямое или обратное, прикладывается к  $p-n$ -переходу при реализации фотодиодного режима?

8. Нарисуйте схему фотодиодного приемника при его работе в фотогальваническом режиме. Каковы достоинства данного режима?

9. Каковы недостатки фотогальванического режима работы фотодиодного приемника?

10. Каковы недостатки фотодиодного режима работы фотоприемника?

11. Каковы достоинства фотодиодного режима работы фотоприемника?

12. В чем конструктивные отличия фотодиодов  $p-n$ - и  $p-i-n$ -типов? Какие характеристики  $p-i-n$ -фотодиодов определяют возможности их использования в широкополосных радиофотонных устройствах?

13. Как мощность дробового шума связана с полосой рабочих частот фотоприемного устройства?

14. Как мощность теплового шума связана с температурой фотоприемного устройства?

## **Раздел 7 Применение и тенденции развития радиофотонных систем**

### **7.1 Содержание раздела**

Линии передачи типа «точка – точка». Аналоговые волоконно-оптические линии задержки. Широкополосное формирование каналов. Измерение мгновенной частоты. Понижающее преобразование частоты. Диаграммообразование в активных фазированных антенных решетках (АФАР). Фотонные методы генерации радиосигналов. Фотоника миллиметрового диапазона. Интегральная микроволновая фотоника.

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

При изучении раздела «Применение и тенденции развития радиофотонных систем» следует уделить особое внимание на перспективы широкого практического использования радиофотонных систем.

### **7.3 Вопросы для самопроверки**

1. Перечислите основные преимущества аналоговой волоконно-оптической линии связи вместо медного коаксиального кабеля в линии передачи «точка – точка».

2. Какие времена хранения широкополосных сигналов могут быть получены с использованием аналоговых волоконно-оптических линий задержки?

3. Нарисуйте структурную схему радиотонного устройства, реализующую понижающее преобразование частоты с непосредственной модуляцией в фотонной линии.

4. Как реализуется диаграммообразование в АФАР?

5. Нарисуйте структурную схему оптоэлектронного генератора с фотонной линией в цепи обратной связи.

6. Нарисуйте структурную схему фотонного устройства, позволяющего реализовать генерацию сигнала миллиметрового диапазона, модулированного передаваемыми данными, с использованием оптического гетеродинамирования.

7. Какие материалы перспективны для реализации устройств интегральной микроволновой фотоники?

## Раздел 8 Темы практических занятий

На практических занятиях студенты рассматривают варианты задач. Целью занятий является углубление понимания процессов, происходящих в элементах радиотонных устройств и при практическом применении в радиотонных системах передачи и обработки широкополосных аналоговых сигналов. Уделяется внимание таким вопросам, как волновые уравнения для полей в световодах, планарных и полосковых волноводах; характеристики элементов радиотонных устройств; их применение в системах передачи и обработки данных.

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. Волоконные световоды, планарные и полосковые волноводы.
2. Лазеры для радиотонных систем.
3. Энергетические и временные характеристики волоконных лазеров.
4. Измерительные и интерферометрические системы на основе волоконных лазеров.

### 8.1 Волоконные световоды, планарные и полосковые волноводы

#### 8.1.1 Примеры решения задач по теме «Волоконные световоды, планарные и полосковые волноводы»

**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 и сторонние токи отсутствующими.

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

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

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

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

Используя далее уравнение

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

в котором с учетом условий задачи полагаем, что

$$\vec{\delta}_{\text{compl}} = \vec{\delta}_{\text{disp}} = \partial \vec{D} / \partial t = \varepsilon \partial \vec{E} / \partial t,$$

получаем

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{E} + \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0.$$

Используя далее соотношение  $\operatorname{rot} \operatorname{rot} = \operatorname{grad} \operatorname{div} - \nabla^2$ , находим

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

**Ответ:**

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

**Задача 2.** Монохроматическая световая волна накачки с максимальной амплитудой продольной компоненты  $E_{zm} = 10$  В/м при  $z = 0$ , распространяется в активированном волоконном световоде, характеризуемом для неё коэффициентом затухания 50 дБ/км. Определите максимальную амплитуду напряженности поля для данной волны при  $z = 60$  м.

**Решение.** Используя соотношение для амплитуды напряженности электрического поля в среде с коэффициентом затухания  $\gamma$ , измеряемом в дБ/км, как

$$E_{zm}(z) = E_{zm}(0) 10^{-\frac{\gamma z}{20}},$$

находим  $E_{zm}(z) = 7,07$  В/м.

**Ответ:**  $E_{zm}(z) = 7,07$  В/м.

### 8.1.2 Варианты задач для самоподготовки

1. Из уравнений Максвелла в дифференциальной форме и материальных уравнений для изотропной непроводящей среды получите волновое уравнение для вектора напряженности магнитного поля  $\vec{H}$ , считая свободные заряды и сторонние токи отсутствующими.

2. Используя формулы для оператора rot в цилиндрической системе координат, из уравнения Максвелла

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t},$$

найдите связь компонент вектора  $E_r$ ,  $E_\varphi$  и  $E_z$  электрического поля с компонентами  $H_r$ ,  $H_\varphi$  и  $H_z$  магнитного поля.

3. Используя формулы для оператора rot в цилиндрической системе координат, из уравнения Максвелла

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t},$$

найдите связь компонент вектора  $H_r$ ,  $H_\varphi$  и  $H_z$  магнитного поля с компонентами  $E_r$ ,  $E_\varphi$  и  $E_z$  электрического поля.

4. Используя формулы для оператора  $\nabla^2$  в цилиндрической системе координат, запишите волновое уравнение

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$$

для продольной составляющей электрического поля  $E_z$ .

5. Используя формулы для оператора  $\nabla^2$  в цилиндрической системе координат и волновое уравнение для вектора магнитного поля  $\vec{H}$ , полученное при решении задачи 1, запишите его для продольной составляющей  $H_z$ .

6. Используя решение в виде распространяющейся вдоль оси  $z$  волны с плоским волновым фронтом и периодичностью распределения её амплитуды в азимутальной плоскости

$$E_z(r, \varphi, z) = R(r) \exp(im\varphi) \exp[i(\omega t - \beta z)], \quad m = 0, 1, 2, \dots,$$

из волнового уравнения для  $E_z$  в цилиндрической системе координат (см. задачу 4) найдите волновое уравнение для распределения амплитуды  $R(r)$  в волноводе круглого сечения.

7. Монохроматическая световая волна накачки с максимальной интенсивностью  $I_m(0) = 100 \text{ Вт/м}^2$  при  $z = 0$ , распространяется в активированном волоконном световоде, характеризуемом для неё коэффициентом затухания 400 дБ/км. Определите максимальную интенсивность для данной волны при  $z = 7,5 \text{ м}$ .

8. Монохроматическая сигнальная световая волна на входе волоконного усилителя (при  $z = 0$ ) имеет интенсивность в максимуме светового поля  $I_m(0) = 10 \text{ мВт/см}^2$ . Определите максимальную

интенсивность для данной волны на его выходе при  $z = 10$  м, для коэффициента усиления, составляющего 2 дБ/м.

**9.** 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 для моды  $\text{TE}_2$ , возбуждаемой излучением с длиной волны 633 нм. Покровной средой в данной структуре является воздух.

**10.** 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  $E_{my}(x)$ .

**11.** 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.

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

**13.** 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.

**14.** 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  $H_{my}(x)$ .

**15.** Используя соотношения, полученные в задаче **14**, найдите распределение поля  $H_{my}(x)$  в  $\text{TM}$ -моды для пленочного планарного волновода. Нормалью к поверхности волновода является ось  $x$ , а свет распространяется вдоль оси  $z$ . Волновод состоит из электрической 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.

## 8.2 Лазеры для радиофотонных систем

### 8.2.1 Примеры решения задач по теме «Лазеры для радиофотонных систем»

**Задача 1.** Для волоконного лазера на основе световода из кварцевого стекла, легированного ионами  $\text{Nd}^{3+}$ , с излучением на длине волны  $\lambda = 1340$  нм на основной моде  $\text{HE}_{11}$  с эффективным показателем преломления  $n_{\text{eff}} = 1,465$ , определите необходимый пространственный период  $\Lambda$  брэгговского зеркала.

**Решение.** Из соотношения

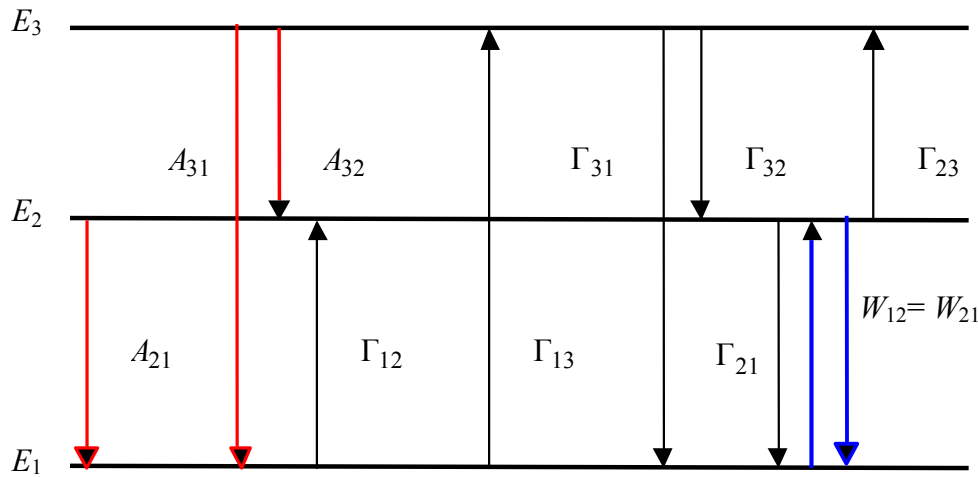
$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda,$$

где  $\lambda_B$  – длина волны брэгговского резонанса, находим  $\Lambda = 577$  нм.

**Ответ:**  $\Lambda = 457$  нм.

**Задача 2.** Запишите балансное уравнение для числа частиц на уровне 1 трехуровневой системы волоконного лазера на основе световода из кварцевого стекла, легированного ионами  $\text{Er}^{3+}$ , 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:**

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

### 8.2.2 Варианты задач для самоподготовки

1. Для волоконного лазера на основе световода из кварцевого стекла, легированного ионами  $\text{Yb}^{3+}$ , с излучением на длине волны  $\lambda = 1050$  нм на основной моде  $\text{HE}_{11}$  с эффективным показателем преломления  $n_{\text{eff}} = 1,467$ , определите необходимый пространственный период  $\Lambda$  брэгговского зеркала.

2. Для волоконного лазера на основе световода из кварцевого стекла, легированного ионами  $\text{Er}^{3+}$ , с излучением на длине волны  $\lambda = 1550$  нм на основной моде  $\text{HE}_{11}$  с эффективным показателем преломления  $n_{\text{eff}} = 1,466$ , определите необходимый пространственный период  $\Lambda$  брэгговского зеркала.

3. Для волоконного лазера на основе световода из кварцевого стекла, легированного ионами  $\text{Yb}^{3+}$ , с излучением на длине волны  $\lambda = 1050$  нм на основной моде  $\text{HE}_{11}$  с эффективным показателем преломления  $n_{\text{eff}} = 1,467$ , и параметром волокна  $V = 2,1$ , определите коэффициент отражения по интенсивности  $R_I$  брэгговского зеркала с длиной решетки  $l = 5$  мм,

амплитудой модуляции показателя преломления  $\Delta n = 5 \times 10^{-4}$  и пространственным периодом  $\Lambda$ , найденным при решении задачи 1.

4. Для волоконного лазера на основе световода из кварцевого стекла, легированного ионами  $\text{Er}^{3+}$ , с излучением на длине волны  $\lambda = 1550$  нм на основной моде  $\text{HE}_{11}$  с эффективным показателем преломления  $n_{\text{eff}} = 1,466$ , и параметром волокна  $V = 2,1$ , определите коэффициент отражения по интенсивности  $R_I$  брэгговского зеркала с длиной решетки  $l = 5$  мм, амплитудой модуляции показателя преломления  $\Delta n = 1 \times 10^{-4}$  и пространственным периодом  $\Lambda$ , найденным при решении задачи 2.

5. Для волоконного лазера на основе световода из кварцевого стекла, легированного ионами  $\text{Nd}^{3+}$ , с излучением на длине волны  $\lambda = 1340$  нм на основной моде  $\text{HE}_{11}$  с эффективным показателем преломления  $n_{\text{eff}} = 1,467$ , и параметром волокна  $V = 2,2$ , определите коэффициент отражения по интенсивности  $R_I$  зеркала на длине волны брэгговского резонанса  $\lambda_B$ , имеющего длину решетки  $l = 3$  мм и амплитуду модуляции показателя преломления  $\Delta n = 3 \times 10^{-5}$ .

6. Запишите балансное уравнение для числа частиц на уровне 3 четырехуровневой системы волоконного лазера на основе световода из кварцевого стекла, легированного ионами  $\text{Nd}^{3+}$ , с учетом воздействующего на нее электромагнитного поля, имеющего частоту  $\omega_{41}$ , и всех других возможных переходов.

7. Лазер с синхронизацией мод 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.

8. Для волоконного непрерывного лазера с цилиндрической сердцевиной с диаметром  $a = 6$  мкм, генерирующего на основной моде  $\text{HE}_{11}$  пучок с длиной волны 1050 нм и выходной мощностью 10 мВт, определите выходную интенсивность излучения.

9. Лазер генерирует в периодическом режиме импульсы с длительностью 100 нс и частотой повторения 20 кГц и имеет импульсную выходную мощность 20 кВт. Оцените для данного лазера среднюю выходную мощность и энергию в импульсе генерации.

10. Для лазера, генерирующего в периодическом режиме импульсы с энергией 0.1 мДж, длительностью 80 нс и частотой повторения 100 кГц, определите мощность в импульсе и среднюю мощность излучения.

11. Для волоконного непрерывного лазера с цилиндрической сердцевиной с диаметром  $a = 10$  мкм, генерирующего на основной моде  $\text{HE}_{11}$  пучок с длиной волны 1550 нм и выходной мощностью 1 Вт, определите выходную интенсивность излучения.

12. Для лазера, генерирующего в периодическом режиме импульсы с энергией 1 мДж и длительностью 100 нс, определите частоту повторения, обеспечивающую среднюю мощность излучения 1 Вт.

13. Для лазера, генерирующего в периодическом режиме импульсы с энергией 5 мДж и длительностью 1 мкс, определите частоту повторения, обеспечивающую среднюю мощность излучения 2 Вт.

14. Для инжекционного лазера на двойной гетероструктуре InGaAsP длина волны генерируемого излучения составляет 1550 нм. Оцените ширину запрещенной зоны для той области гетероструктуры, в которой происходят индуцированные переходы при излучательной рекомбинации электронов и дырок.

15. 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 полуволн, укладываемых вдоль оси резонатора, если длина волны генерируемого излучения равна 400 нм.

16. 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.

### 8.3 Электрооптические модуляторы для радиофотонных систем

#### 8.3.1 Примеры решения задач по теме «Электрооптические модуляторы для радиофотонных систем»

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

Примите во внимание, что в кристалле данной симметрии:

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

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

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

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

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

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

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

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

**Ответ:**

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

**Задача 2.** Используя полученный в предыдущей задаче тензор диэлектрической проницаемости, найдите систему алгебраических уравнений для компонент вектора поляризации  $e_j$  плоской световой волны, распространяющейся в кубическом кристалле симметрии 23 вдоль оси  $y$ .

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

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

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

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

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

$$(n^2 - n_0^2) e_1 + ig_0 e_3 = 0.$$

Для  $i = 2$  получаем второе уравнение:

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

и для  $i = 3$  – третье:

$$-ig_0 e_1 + (n^2 - n_0^2) e_3 = 0.$$

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

$$\begin{cases} (n^2 - n_0^2) e_1 + ig_0 e_3 = 0, \\ (n^2 - n_0^2) e_2 = 0, \\ -ig_0 e_1 + (n^2 - n_0^2) e_3 = 0. \end{cases}$$

### 8.3.2 Варианты задач для самоподготовки

1. 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).

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  $x$ .

3. 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.

4. Используя полученную при решении задачи 2 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.

5. 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.

6. Используя условия предыдущей задачи 5, найдите возмущения компонент тензора относительной диэлектрической проницаемости

кристалла титаната висмута, наведенные приложенным электрическим полем.

7. К кристаллу ниобата лития приложено электрическое поле с напряженностью 10 кВ/см вдоль оси  $y$ . Используя значения показателей преломления  $n_o=2,2407$ ,  $n_e=2,1441$  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 1350 нм, найдите возмущения компонент тензора относительной диэлектрической проницаемости.

8. К кристаллу ниобата лития приложено электрическое поле с напряженностью 20 кВ/см вдоль оси  $z$ . Используя значения показателей преломления  $n_o=2,2405$ ,  $n_e=2,1379$  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 1550 нм, найдите возмущения компонент тензора относительной диэлектрической проницаемости.

9. В волноводном фазовом электрооптическом модуляторе на полосковом волноводе  $\text{Ti:LiNbO}_3$  электрическое поле приложено вдоль оси  $z$  кристалла. Найдите полуволновое напряжение для моды с эффективным показателем преломления  $n_{eff}=2,2401$  на рабочей длине волны 1550 нм, имеющей максимальную компоненту электрической напряженности светового поля также вдоль оси  $z$ , для длины электродов модулятора 5 мм. При расчетах используйте значения 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.

10. Для интерферометрического волноводного модулятора Маха-Цендера с полуволновым напряжением  $U_{\lambda/2}=5$  В в каждом плече постройте зависимость пропускания по интенсивности от приложенного напряжения.

## 9 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. История развития радиофотоники.
2. Вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна.
3. Фазовая кросс-модуляция.
4. Лазеры с распределенным брэгговским отражением.
5. Особенности волоконных световодов как усилительной среды.
6. Оптические спектральные фильтры.
7. Поляризационно-независимые переключатели.

8. Эффективность преобразования световой мощности в фотодетекторе.

9. Современное состояние фотодетекторов высокой мощности.

10. Широкополосное формирование каналов.

11. Фотоника миллиметрового диапазона.

12. Интегральная микроволновая фотоника.

Студент защищает реферат по выбранной им теме.

## **10 Подготовка к контрольной работе**

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

1. Волоконные световоды, планарные и полосковые волноводы. Распространение модулированного оптического излучения в волоконных световодах. Лазеры для радиофотонных систем.

2. Электрооптические модуляторы для радиофотонных систем. Фотодетекторы для радиофотонных систем. Применение и тенденции развития радиофотонных систем.

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 8).

### **10.1 Теоретические вопросы для письменной контрольной работы по темам «Волоконные световоды, планарные и полосковые волноводы. Распространение модулированного оптического излучения в волоконных световодах. Лазеры для радиофотонных систем»**

1. Дайте определение понятию «критический угол».

2. Сформулируйте условия существования направляемых мод в световоде и планарных волноводах в приближениях геометрической оптики.

3. Поясните, чем отличаются ТЕ- и ТМ-моды волоконных световодов и планарных волноводов.

4. Поясните, чем отличаются волоконные световоды и планарные волноводы со ступенчатым и с градиентным профилями показателя преломления.

5. Поясните, что означает понятие отсечки моды. Все ли моды имеют отсечку?

6. Какие моды называются меридиональными? Моды каких порядков (в соответствии с электромагнитной теорией) цилиндрического световода являются меридиональными?

7. Поясните, что представляют собой гибридные моды цилиндрического световода.



8. Опишите, какие физические явления обусловлены дисперсией, присущей волоконным световодам.

9. Опишите, в чем преимущество использования градиентных волоконных световодов.

10. Опишите, какими физическими факторами обусловлены оптические потери в волоконных световодах.

11. Опишите, чем определяются оптические потери в планарных и полосковых оптических волноводах.

11. Опишите, какие материалы используются в качестве основы для лазерных волоконных световодов.

12. Поясните, какие химические элементы используются для создания активных волоконных световодов, позволяющих создать в них оптической накачкой состояние инверсии населенностей. Между уровнями какой оболочки примесных ионов необходимо инициировать для этого электронные переходы?

13. Опишите, какие источники оптического излучения используются для накачки волоконных лазеров.

14. Какова цель использования двойной оболочки в лазерных волоконных световодах? Почему любая некруглая форма поперечного сечения внутренней оболочки предпочтительней, чем круглая?

15. Опишите, как можно реализовать зеркала в волоконных лазерах.

16. На какой длине волны происходит отражение от волоконных брэгговских решеток?

17. Как создаются волоконные брэгговские решетки? От каких параметров решетки зависит коэффициент отражения излучения?

18. Опишите переходы между уровнями примесных ионов, позволяющие реализовать состояние инверсии населенностей при трехуровневой схеме накачки.

19. Опишите переходы между уровнями примесных ионов, позволяющие реализовать состояние инверсии населенностей при четырехуровневой схеме накачки.

20. Опишите принцип действия волоконных лазеров, основанных на вынужденном комбинационном рассеянии.

21. Опишите, какие нелинейные эффекты в волоконных световодах определяются восприимчивостью третьего порядка.

22. Опишите, к каким искажениям модулированного оптического излучения при его передаче по волоконному световоду приводит двойное рэлеевское рассеяние?

23. Опишите, какие внешние воздействия на волоконный световод оказывает наибольшее влияние на стабильность фазы передаваемого модулирующего радиочастотного сигнала.

24. Опишите, что такое хроматическая дисперсия оптического волокна.

25. Опишите нелинейные эффекты, которые могут наблюдаться в волоконных световодах за счет четырехволнового смешения.

26. Опишите, какие поляризационные эффекты могут наблюдаться в волоконных световодах радиофотонных систем.

27. Опишите, к какому виду помех приводит вынужденное комбинационное рассеяние в многоканальных радиофотонных линиях.

28. Поясните, каким образом можно задать длину волны излучения лазеров на основе твердых растворов GaAlAs и InGaAsP.

29. Поясните, каковы физические причины снижения порогового тока в лазерах на основе двойной гетероструктуры.

30. Нарисуйте схему расположения слоёв в полосковом лазере на основе двойной гетероструктуры.

31. Поясните, каковы особенности лазеров с распределенным брэгговским отражением.

32. Какие виды токовой модуляции реализуются в полупроводниковых инжекционных гетеролазерах?

33. Опишите, каковы особенности стыковки полосковых лазеров с одномодовыми волоконными световодами.

34. В каком спектральном диапазоне может генерировать излучение волоконный лазер на основе световодов, легированных  $\text{Nd}^{3+}$ ? Какое излучение накачки необходимо использовать для волоконного лазера на основе световодов, легированных  $\text{Nd}^{3+}$ ?

35. В каком спектральном диапазоне может генерировать излучение волоконный лазер на основе световодов, легированных  $\text{Er}^{3+}$ ? Какое излучение накачки необходимо использовать для волоконного лазера на основе световодов, легированных  $\text{Er}^{3+}$ ?

## **10.2 Теоретические вопросы для письменной контрольной работы по темам «Электрооптические модуляторы для радиофотонных систем. Фотодетекторы для радиофотонных систем. Применение и тенденции развития радиофотонных систем»**

1. Поясните, в чем суть явления «линейный электрооптический эффект Поккельса». В каких кристаллах он наблюдается?

2. Поясните, тензором какого ранга описывается линейный электрооптический эффект.

3. Опишите, какой вид имеет электрооптический тензор в кубических нецентросимметричных кристаллах.

4. Какой вид имеет электрооптический тензор в кристаллах симметрии  $4mm$ ?

5. Какой вид имеет электрооптический тензор в кристаллах симметрии  $3m$ ?

6. Какой вид имеет электрооптический тензор в кристаллах симметрии  $mm2$ ?

7. Опишите, каким образом в объемных электрооптических модуляторах создается однородное электрическое поле.

8. Поясните, какое напряжение в электрооптическом модуляторе называют полуволновым.

9. Нарисуйте схему реализации амплитудной электрооптической модуляции с использованием объемного кристалла ниобата лития.

10. Нарисуйте примерный вид амплитудной характеристики объемного электрооптического модулятора.

11. Нарисуйте конфигурацию электродов волноводных электрооптических модуляторов, использующих параллельную или перпендикулярную компоненту электрического поля по отношению к поверхности кристалла.

12. Нарисуйте конфигурацию полосковых волноводов и электродов, создающих электрическое поле, при которой реализуется интерферометрическая модуляция интенсивности светового излучения.

13. Поясните физические принципы, на которых основана волноводная электрооптическая модуляция брэгговского типа на периодически поляризованных доменных структурах.

14. Поясните, что такое токовая монохроматическая чувствительность фотоприемника. В каких единицах она измеряется?

15. Поясните, какой спектральный диапазон фотоприемных устройств соответствует минимальным потерям в кварцевых волоконных световодах.

16. Поясните, как связаны между собой собственная постоянная времени фотоприемника и граничная частота модуляции.

17. Нарисуйте энергетическую диаграмму для собственного полупроводника при температуре абсолютного нуля и поясните условия генерации электронно-дырочных пар при поглощении фотона. Какой должна быть его энергия?

18. Нарисуйте энергетическую диаграмму для полупроводника донорного  $n$ -типа при температуре абсолютного нуля и поясните условия генерации электронно-дырочных пар и неравновесных электронов при поглощении фотонов.

19. Нарисуйте энергетическую диаграмму для полупроводника акцепторного  $p$ -типа при температуре абсолютного нуля и поясните условия генерации электронно-дырочных пар и неравновесных дырок при поглощении фотонов.

20. Поясните, какое напряжение, прямое или обратное, прикладывается к  $p$ - $n$ -переходу при реализации фотодиодного режима.

21. Нарисуйте схему фотодиодного приемника при его работе в фотогальваническом режиме. Каковы достоинства данного режима?

22. Опишите недостатки фотогальванического режима работы фотодиодного приемника.

23. Опишите недостатки фотодиодного режима работы фотоприемника.

24. Опишите достоинства фотодиодного режима работы фотоприемника.

25. Поясните, в чем конструктивные отличия фотодиодов  $p-n$ - и  $p-i-n$ -типов. Какие характеристики  $p-i-n$ -фотодиодов определяют возможности их использования в широкополосных радиопотонных устройствах?

26. Опишите, как мощность дробового шума связана с полосой рабочих частот фотоприемного устройства.

27. Опишите, как мощность теплового шума связана с температурой фотоприемного устройства.

28. Нарисуйте структурную схему радиопотонного устройства, реализующую понижающее преобразование частоты с непосредственной модуляцией в фотонной линии.

29. Поясните, как реализуется диаграммообразование в АФАР.

30. Нарисуйте структурную схему оптоэлектронного генератора с фотонной линией в цепи обратной связи.

31. Нарисуйте структурную схему фотонного устройства, позволяющего реализовать генерацию сигнала миллиметрового диапазона, модулированного передаваемыми данными, с использованием оптического гетеродинамирования.

32. Опишите материалы, перспективные для реализации устройств интегральной микроволновой фотоники.

### Тестовые вопросы

1. При полном внутреннем отражении:

- а) отраженная волна в оптически более плотной среде отсутствует;
- б) отраженная волна в оптически менее плотной среде отсутствует;
- в) преломленная волна в оптически более плотной среде отсутствует;
- г) преломленная волна в оптически менее плотной среде отсутствует.

2. В планарном волноводе показатель преломления волноводного слоя:

- а) должен превышать показатели преломления подложки и покровной среды;
- б) должен быть равным показателю преломления подложки и превышать показатель преломления покровной среды;
- в) должен быть равным показателю преломления покровной среды и превышать показатель преломления подложки;
- г) не должен превышать показатели преломления как для подложки, так и для покровной среды.

3. В волоконном световоде показатель преломления сердцевины:

- а) должен быть равен показателю преломления внутренней оболочки;
- б) должен быть меньше показателя преломления внутренней оболочки;

- в) должен быть больше показателя преломления внутренней оболочки;
- г) должен быть меньше показателя преломления внешней оболочки.

4. В градиентном волоконном световоде показатель преломления:
- а) не изменяется в пределах сердцевины, резко уменьшаясь на границе с внутренней оболочкой;
  - б) плавно уменьшается от центра сердцевины к краям;
  - г) плавно увеличивается от центра сердцевины к краям;
  - д) плавно изменяется вдоль оси световода.

5. Основная мода волоконного световода  $HE_{11}$ :
- а) характеризуется нулевым значением напряженности электрического поля в центре сердцевины;
  - б) максимальным значением напряженности электрического поля в центре сердцевины;
  - в) постоянным значением напряженности электрического поля в сердцевине;
  - г) постоянным значением напряженности магнитного поля в сердцевине.

6. В цилиндрическом волоконном световоде не имеют отсечки:
- а) моды  $TM_{01}$  и  $TE_{01}$ ;
  - б) моды  $HE_{21}$  и  $EH_{21}$ ;
  - в) мода  $HE_{11}$ ;
  - г) мода  $EH_{11}$ .

7. Волноводная дисперсия в волоконных световодах заключается:
- а) в зависимости магнитной проницаемости сердцевины от длины волны излучения;
  - б) в зависимости показателя преломления сердцевины от длины волны излучения;
  - в) в зависимости показателя преломления внутренней оболочки от длины волны излучения;
  - г) в зависимости постоянной распространения моды от длины волны излучения.

8. В активирующих примесях волоконных световодов для получения лазерной генерации используются:
- а) электронные переходы между уровнями незаполненной внутренней f-оболочки ионов редкоземельных элементов;
  - б) колебательно-вращательные переходы;
  - в) только безызлучательные переходы;
  - г) только спонтанные переходы.

9. Для создания состояния инверсии населенностей в активной области волоконного лазера используются:

- а) столкновения 1-го рода;
- б) накачка электронным пучком;
- в) оптическая накачка;
- г) электронно-дырочная рекомбинация в пределах узкозонной области гетероструктуры.

10. Брэгговские зеркала в волоконных световодах реализуются:

- а) за счет отражения от атомных плоскостей кристаллов;
- б) за счет сколов торцов волокон, ортогональных их оси;
- в) за счет периодических возмущений магнитной проницаемости волокна;
- г) за счет фотоиндуцированных решеток показателя преломления в волоконном световоде.

11. В схемах накачки активных световодов используется:

- а) точечное облучение сфокусированным излучением через цилиндрическую боковую поверхность;
- б) сканирование пучка накачки по боковой поверхности световода;
- в) принцип распределения вводимого излучения накачки по длине активного световода с использованием набора V-образных канавок или двойного волоконного световода с общим полимерным покрытием;
- г) генерация излучения накачки в световоде за счет катодолюминесценции.

12. Пространственный период брэгговской решетки, обеспечивающей селективное отражение:

- а) пропорционален произведению длины волны генерируемого излучения и эффективного показателя преломления используемой волноводной моды;
- б) прямо пропорционален половине длины волны генерируемого излучения и обратно пропорционален эффективному показателю преломления используемой волноводной моды;
- в) прямо пропорционален половине длины волны излучения накачки и обратно пропорционален эффективному показателю преломления используемой волноводной моды;
- г) обратно пропорционален произведению длины волны генерируемого излучения и эффективного показателя преломления используемой волноводной моды.

13. Использование брэгговских зеркал в волоконных лазерах обеспечивает:

- а) многомодовую генерацию в широкой области спектра;

- б) эффективное использование излучения накачки;
- в) одномодовую генерацию излучения с высокой степенью монохроматичности и большой длиной когерентности;
- г) импульсный режим генерации.

14. Волоконные лазеры на основе световодов, легированных  $\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$ ,  $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Tm}^{3+}$  и  $\text{Ho}^{3+}$  генерируют излучение:

- а) в видимой области спектра;
- б) в ближней инфракрасной области;
- в) в ближней ультрафиолетовой области;
- г) в дальней инфракрасной области.

15. В волоконных световодах восприимчивостью третьего порядка определяется:

- а) параметрическое четырехволновое смешение;
- б) линейное распространение света в волокне;
- в) генерация второй гармоники;
- г) эффект оптического выпрямления.

16. В полупроводниковом лазере на двойной гетероструктуре излучательная рекомбинация электронов и дырок происходит:

- а) в широкозонном слое, расположенным между узкозонными слоями с проводимостью  $n$ - и  $p$ -типов;
- б) в узкозонном слое, расположенным между широкозонными слоями с проводимостью  $n$ - и  $p$ -типов;
- в) в узкозонном слое, примыкающем к омическому контакту;
- г) в широкозонном слое, примыкающем к омическому контакту.

17. В электрооптических модуляторах на ниобате лития оптимальным является использование конфигурации:

- а) электрическое поле приложено вдоль оси  $y$ , максимальная компонента электрической напряженности светового поля направлена вдоль оси  $y$ ;
- б) электрическое поле приложено вдоль оси  $y$ , максимальная компонента электрической напряженности светового поля направлена вдоль оси  $z$ ;
- в) электрическое поле приложено вдоль оси  $z$ , максимальная компонента электрической напряженности светового поля направлена вдоль оси  $z$ ;
- г) электрическое поле приложено вдоль оси  $z$ , максимальная компонента электрической напряженности светового поля направлена вдоль оси  $y$ .

18. Для обеспечения минимальной интенсивности света на выходе интерферометрического волноводного модулятора Маха-Цендера на его плечи нужно подать напряжение:

- а) равное полуволновому напряжению;
- б) равное удвоенному значению полуволнового напряжения;
- в) равное значению, превышающему полуволновое напряжение в  $\sqrt{2}$  раз;
- г) равное половине полуволнового напряжения.

19. В *p-i-n*-фотодиоде *i*-слой собственного полупроводника:

- а) обеспечивает увеличение емкости фотоприемного устройства и уменьшение поглощения регистрируемого светового излучения;
- б) обеспечивает увеличение емкости фотоприемного устройства и увеличение поглощения регистрируемого светового излучения;
- в) обеспечивает уменьшение емкости фотоприемного устройства и увеличение поглощения регистрируемого светового излучения;
- г) обеспечивает уменьшение предельного обратного напряжения смещения при фотодиодном режиме.

20. В фотоприемных устройствах граничная частота демодуляции:

- а) прямо пропорциональна собственной постоянной времени фотодиода;
- б) обратно пропорциональна собственной постоянной времени фотодиода;
- в) обратно пропорциональна квадрату собственной постоянной времени фотодиода;
- г) прямо пропорциональна корню квадратному из собственной постоянной времени фотодиода.

### Рекомендуемая литература

1. Цуканов, В.Н. Волоконно-оптическая техника. Практическое руководство [Электронный ресурс] : руководство / В.Н. Цуканов, М.Я. Яковлев. — Электрон. дан. — Вологда : "Инфра-Инженерия", 2017. — 304 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/95775>.

2. Богданов А.В., Голубенко Ю.В. Волоконные технологические лазеры и их применение : Учебное пособие. 2 е изд., испр. и доп. — СПб.: Издательство «Лань», 2018. — 236 с.: ил. ISBN 978-5-8114-2027-8, [https://e.lanbook.com/book/101825#book\\_name](https://e.lanbook.com/book/101825#book_name).

3. Панов М.Ф. Физические основы интегральной оптики : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / М.Ф. Панов, А.В. Соломонов, Ю.В. Филатов. — М. : Издательский центр «Академия», 2010. — 432 с. ISBN 978-5-7695-5976-1



4. Урик Винсент Дж.-мл., МакКинни Джейсон Д., Вилльямс Кейт Дж. Основы микроволновой фотоники. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016. – 376 с. ISBN 978-5-94836-445-2
5. Курков А.С., Дианов Е.М. Непрерывные волоконные лазеры средней мощности // Квантовая электроника. – 2004. – Т. 34. – № 10. – С. 881–900.
6. Васильев С.А., Медведков О.И., Королев И.Г., Божков А.С., Курков А.С., Дианов Е.М. Волоконные решетки показателя преломления и их применения // Квантовая электроника. – 2005. – Т. 35. – № 12. – С. 1085–1103.
7. Дианов Е.М. Волоконные лазеры // УФН. – 2004. – Т. 174. – № 10. – С. 1139–1142.
8. Othonos A. Fiber Bragg gratings // Rev. Sci. Instruments. – 1997. – V. 68. – No. 12. – P. 4309–4341.
9. Айхлер Ю., Айхлер Г.Н. Лазеры. Исполнение, управление, применение. М.: Техносфера, 2012. – 496 с. ISBN 978-5-94836-309-7.
10. 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).
11. 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>.
12. 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>.
13. Пихтин А.Н. Оптическая и квантовая электроника. Учебник для ВУЗов.- М.: Высшая школа, 2001. – 574 с.
14. Ярив А. Оптические волны в кристаллах / А. Ярив, П. Юх. – М.: Мир, 1987. – 616 с.
15. Звелто О. Принципы лазеров / О. Звелто. – СП-б. : Лань, 2008. – 720 с.
16. Волноводная оптоэлектроника: Пер. с англ. / Под ред. Т. Тамира. – М.: Мир, 1991. – 575 с. ISBN 5-03-001903-0
17. Никоноров Н.В., Шандаров С.М. Волноводная фотоника: Учебное пособие. – СПб.: Издательство СПбГУ ИТМО, 2008 – 142 с.
18. 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, 2018. – 127 с., <https://edu.tusur.ru/publications/7307>

Учебно-методическое пособие

Шандаров С.М.

Буримов Н.И.

Радиофотоника

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