

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

Кафедра электронных приборов

## **ВОЛОКОННЫЕ ЛАЗЕРЫ**

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

2018

**Шандаров, Станислав Михайлович**

**Буримов, Николай Иванович**

Волоконные лазеры: методические указания к практическим занятиям и по самостоятельной работе для студентов направления 12.03.03 «Фотоника и оптоинформатика» / 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. – 29 с.

Целью преподавания дисциплины «Волоконные лазеры» является формирование у студентов способности к анализу задач по разработке, эксплуатации и исследованию волоконных лазеров на основе изучения студентами базовых физических принципов функционирования основных элементов волоконных лазерных систем, а также готовности студентов к математическому моделированию физических процессов, определяющих работу волоконных лазеров, и их исследованию на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и самостоятельно разработанных программных продуктов.

Предназначено для студентов очной и заочной форм, обучающихся по направлению 12.03.03 «Фотоника и оптоинформатика» по курсу «Волоконные лазеры».

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.

## **ВОЛОКОННЫЕ ЛАЗЕРЫ**

Методические указания к практическим занятиям  
и по самостоятельной работе  
для студентов направления 12,03,03 «Фотоника и оптоинформатика»

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 .....   | 7  |
| 2.1 Содержание раздела.....   | 7  |
| 2.2 Методические указания по изучению раздела.....  | 7  |
| 2.3 Вопросы для самопроверки.....   | 7  |
| Раздел 3 Элементы волоконного лазера .....  | 7  |
| 3.1 Содержание раздела.....   | 7  |
| 3.2 Методические указания по изучению раздела.....  | 8  |
| 3.3 Вопросы для самопроверки.....   | 8  |
| Раздел 4 Характеристики волоконных лазеров.....   | 8  |
| 4.1 Содержание раздела.....   | 8  |
| 4.2 Методические указания по изучению раздела.....  | 9  |
| 4.3 Вопросы для самопроверки .....  | 9  |
| Раздел 5 Волоконные промышленные лазеры и их применение .....   | 9  |
| 5.1 Содержание раздела.....   | 9  |
| 5.2 Методические указания по изучению раздела.....  | 9  |
| 5.3 Вопросы для самопроверки.....   | 10 |
| 6 Темы практических занятий.....  | 10 |
| 6.1 Распространение световых волн в волоконных световодах.....  | 11 |
| 6.1.1 Примеры решения задач по теме «Распространение световых волн в волоконных световодах» .....       | 11 |
| 6.1.2 Варианты задач для самоподготовки .....   | 12 |
| 6.2 Элементы волоконного лазера .....   | 13 |
| 6.2.1 Примеры решения задач по теме «Элементы волоконного лазера» .....                                 | 13 |
| 6.2.2 Варианты задач для самоподготовки .....   | 14 |
| 6.3 Энергетические и временные характеристики волоконных лазеров .....                                  | 16 |
| 6.3.1 Примеры решения задач по теме «Энергетические и временные характеристики волоконных лазеров»..... | 16 |
| 6.3.2 Варианты задач для самоподготовки .....   | 16 |

|  |    |
|--|----|
| 6.4 Измерительные и интерферометрические системы на основе волоконных лазеров .....  | 17 |
| 6.4.1 Примеры решения задач по теме «Измерительные и интерферометрические системы на основе волоконных лазеров» .....  | 17 |
| 6.4.2 Варианты задач для самоподготовки .....  | 19 |
| 7 Темы для самостоятельного изучения .....   | 20 |
| 8 Подготовка к контрольной работе.....   | 21 |
| 8.1 Теоретические вопросы для письменной контрольной работы по темам «Волоконные световоды. Элементы волоконных лазеров» .....                                 | 21 |
| 8.2 Теоретические вопросы для письменной контрольной работы по темам «Характеристики волоконных лазеров. Волоконные промышленные лазеры и их применение» ..... | 22 |
| Тестовые вопросы .....   | 23 |
| Рекомендуемая литература .....   | 27 |

## **Введение**

Целью преподавания дисциплины «Волоконные лазеры» является формирование у студентов способности к анализу задач по разработке, эксплуатации и исследованию волоконных лазеров на основе изучения студентами базовых физических принципов функционирования основных элементов волоконных лазерных систем, а также готовности студентов к математическому моделированию физических процессов, определяющих работу волоконных лазеров, и их исследованию на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и самостоятельно разработанных программных продуктов.

Задачей дисциплины «Волоконные лазеры» является изучение основных методов и приемов реализации волоконных лазерных систем, рассмотрение конкретных типов волоконных лазеров, методов их расчета, проектирования и применения в технологических и измерительных системах.

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).
4. «Физика конденсированного состояния» (симметрия структуры и свойств твердых тел, колебания решеток и неупорядоченных структур, электронные возбуждения в твердых телах и их оптические свойства, дефекты в кристаллах).
5. «Физические основы квантовой и оптической электроники» (принцип квантового усиления электромагнитных волн, описание квантовых ансамблей и процессов релаксации, взаимодействие электромагнитного излучения с веществом, общие вопросы построения лазеров, твердотельные лазеры, полупроводниковые лазеры, физические принципы волноводной фотоники и волоконной оптики).

## **Раздел 1 Введение**

### **1.1 Содержание раздела**

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

### **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 волоконных лазерах.

## **Раздел 2 Волоконные световоды**

### **2.1 Содержание раздела**

Волоконные световоды для систем оптической связи и волоконных лазеров. Профили показателя преломления. Геометрическая оптика волоконных световодов. Электромагнитная теория волоконных световодов круглого сечения. Моды 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 волоконных лазерах.

### **2.3 Вопросы для самопроверки**

1. Дайте определение понятию «критический угол».
2. Сформулируйте условия существования направляемых мод в световоде в приближениях геометрической оптики и в рамках электромагнитной теории.
3. Чем отличаются ТЕ- и ТМ-моды?
4. Чем отличаются световоды со ступенчатым и с градиентным профилями показателя преломления?
5. 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. Что представляют собой гибридные моды цилиндрического световода?
8. Какие физические явления обусловлены дисперсией, присущей волоконным световодам?
9. В чем преимущество использования градиентных волоконных световодов?
10. Какими физическими факторами обусловлены оптические потери в волоконных световодах?

## **Раздел 3 Элементы волоконного лазера**

### **3.1 Содержание раздела**

Активирующие примеси для волоконных световодов. Фотоиндуцированные брэгговские решетки показателя преломления в

световодах. Активные волоконные световоды. Схемы накачки активных световодов. Особенности волоконных световодов как усилительной среды.

### 3.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Элементы волоконного лазера» следует обратить внимание на физические явления, на которых основано достижение состояния инверсии населенностей в активированных световодах; на условия брэгговского отражения; на описание усиления в условиях поглощения излучения накачки при его распространении вдоль световода.

### 3.3 Вопросы для самопроверки

1. Какие материалы используются в качестве основы для лазерных волоконных световодов?
2. 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?
3. Какие источники оптического излучения используются для накачки волоконных лазеров?
4. Какова цель использования двойной оболочки в лазерных волоконных световодах? Почему любая некруглая форма поперечного сечения внутренней оболочки предпочтительней, чем круглая?
5. Как можно реализовать зеркала в волоконных лазерах?
6. На какой длине волны происходит отражение от волоконных брэгговских решеток?
7. Как создаются волоконные брэгговские решетки? От каких параметров решетки зависит коэффициент отражения излучения?
8. Опишите переходы между уровнями примесных ионов, позволяющие реализовать состояние инверсии населенностей при трехуровневой схеме накачки.
9. Опишите переходы между уровнями примесных ионов, позволяющие реализовать состояние инверсии населенностей при четырехуровневой схеме накачки.
10. Опишите принцип действия волоконных лазеров, основанных на вынужденном комбинационном рассеянии.

## Раздел 4 Характеристики волоконных лазеров

### 4.1 Содержание раздела

Лазеры на основе световодов, легированных  $\text{Nd}^{3+}$ . Лазеры на основе световодов, легированных  $\text{Yb}^{3+}$ . Лазеры на основе световодов,



легированных  $\text{Er}^{3+}$ . Лазеры на основе световодов, легированных  $\text{Tm}^{3+}$ . Лазеры на основе световодов, легированных  $\text{Ho}^{3+}$ .

## 4.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Характеристики волоконных лазеров» следует обратить внимание на спектральные характеристики лазеров, легированных различными ионами; на соответствующие требования к длине волны излучения накачки; на особенности схемы переходов между уровнями, обеспечивающей реализацию состояния инверсии населенностей.

## 4.3 Вопросы для самопроверки

1. В каком спектральном диапазоне может генерировать излучение волоконный лазер на основе световодов, легированных  $\text{Nd}^{3+}$ ?
2. Какое излучение накачки необходимо использовать для волоконного лазера на основе световодов, легированных  $\text{Nd}^{3+}$ ?
3. В каком спектральном диапазоне может генерировать излучение волоконный лазер на основе световодов, легированных  $\text{Yb}^{3+}$ ?
4. Какое излучение накачки необходимо использовать для волоконного лазера на основе световодов, легированных  $\text{Yb}^{3+}$ ?
5. В каком спектральном диапазоне может генерировать излучение волоконный лазер на основе световодов, легированных  $\text{Er}^{3+}$ ?
6. Какое излучение накачки необходимо использовать для волоконного лазера на основе световодов, легированных  $\text{Er}^{3+}$ ?
7. В каком спектральном диапазоне может генерировать излучение волоконный лазер на основе световодов, легированных  $\text{Tm}^{3+}$ ?
8. Какое излучение накачки необходимо использовать для волоконного лазера на основе световодов, легированных  $\text{Tm}^{3+}$ ?
9. В каком спектральном диапазоне может генерировать излучение волоконный лазер на основе световодов, легированных  $\text{Ho}^{3+}$ ?
10. Какое излучение накачки необходимо использовать для волоконного лазера на основе световодов, легированных  $\text{Ho}^{3+}$ ?

## Раздел 5 Волоконные промышленные лазеры и их применение

### 5.1 Содержание раздела

Продукция отечественных и зарубежных компаний, производящих волоконные лазеры. Лазерная резка. Лазерная сварка. Лазерная маркировка и гравировка. Лазерная микрообработка. Лазерная интерферометрия.

### 5.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Волоконные промышленные лазеры и их применение» следует обратить внимание на особенности их применения

для реализации различных технологических процессов и в измерительных системах.

### 5.3 Вопросы для самопроверки

1. Для резки каких листовых материалов, тонких или толстых, использование волоконных лазеров наиболее целесообразно, в сравнении с лазерами на  $\text{CO}_2$ ?
2. Какую мощность должны обеспечивать волоконные лазеры для сварки металлических материалов – мВт или кВт?
3. Какой режим работы лазера, непрерывный или импульсный, используется для лазерной маркировки изделий?
4. Опишите достоинства волоконно-оптических систем лазерной гравировки.
5. Опишите достоинства волоконно-оптических систем лазерной микрообработки.
6. Опишите достоинства волоконно-оптических систем лазерной микропайки и микросварки.
7. Какие особенности конструкции волоконных лазеров обеспечивают большое значение длины когерентности их излучения?
8. Какой вид когерентности играет наиболее важную роль в лазерных интерферометрических системах?
9. По каким причинам свойство временной когерентности лазерного излучения очень важно для голографии?

## 6 Темы практических занятий

На практических занятиях студенты рассматривают варианты задач. Целью занятий является углубление понимания процессов, происходящих в волоконных лазерах и при использовании излучения этих лазеров в технологических и измерительных системах. Уделяется внимание таким вопросам, как волновые уравнения для полей в световодах, характеристики элементов волоконных лазеров, выходные характеристики волоконных лазерных систем, и их применение в технологических целях.

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. Распространение световых волн в волоконных световодах.
2. Элементы волоконного лазера.
3. Энергетические и временные характеристики волоконных лазеров.
4. Измерительные и интерферометрические системы на основе волоконных лазеров.

## 6.1 Распространение световых волн в волоконных световодах

### 6.1.1 Примеры решения задач по теме «Распространение световых волн в волоконных световодах»

**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

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

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

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

Используя далее уравнение

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

в котором с учетом условий задачи полагаем, что

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

получаем

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

Используя далее соотношение  $\text{rot rot} = \text{grad div} - \nabla^2$ , 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  $E_{zm}(z) = 7,07 \text{ В/м}$ .

**Ответ:**  $E_{zm}(z) = 7,07 \text{ В/м}$ .

### 6.1.2 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

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

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

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

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  $400 \text{ дБ/км}$ . 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  $z = 10 \text{ м}$ , для коэффициента усиления, составляющего  $2 \text{ дБ/м}$ .

9. Для волоконного световода с порогом прочности  $60 \text{ Дж/см}^2$  и диаметром  $50 \text{ мкм}$  определите максимальную энергию лазерных импульсов, которые могут по нему передаваться.

10. Для волоконного световода с порогом прочности  $20 \text{ Дж/см}^2$  и диаметром  $10 \text{ мкм}$  определите максимальную мощность импульсов с длительностью  $10 \text{ нс}$ , которые могут по нему передаваться.

## 6.2 Элементы волоконного лазера

### 6.2.1 Примеры решения задач по теме «Элементы волоконного лазера»

**Задача 1.** Для волоконного лазера на основе световода из кварцевого стекла, легированного ионами  $\text{Nd}^{3+}$ , с излучением на длине волны  $\lambda = 930 \text{ нм}$  на основной моде  $\text{HE}_{11}$  с эффективным показателем преломления  $n_{\text{eff}} = 1,468$ , определите необходимый пространственный период  $\Lambda$  брэгговского зеркала.

**Решение.** Из соотношения

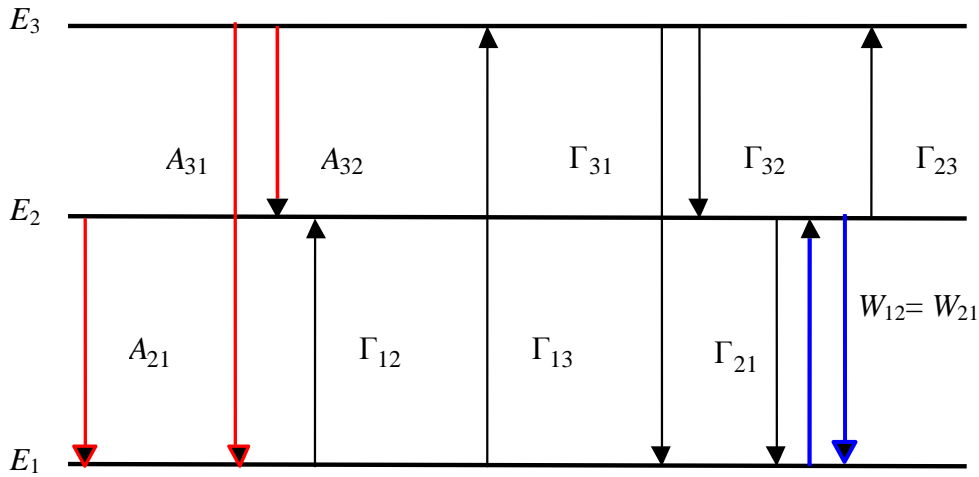
$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda,$$

где  $\lambda_B$  – длина волны брэгговского резонанса, находим  $\Lambda = 317 \text{ нм}$ .

**Ответ:**  $\Lambda = 317 \text{ нм}$ .

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

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

### 6.2.2 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  $\text{Tm}^{3+}$ , с излучением на длине волны  $\lambda = 1850$  нм на основной моде  $\text{HE}_{11}$  с эффективным показателем преломления  $n_{\text{eff}} = 1,465$ , определите необходимый пространственный период  $\Lambda$  брэгговского зеркала.

4. Для волоконного лазера на основе световода из кварцевого стекла, легированного ионами  $\text{Ho}^{3+}$ , с излучением на длине волны  $\lambda = 2000$  нм на основной моде  $\text{HE}_{11}$  с эффективным показателем преломления  $n_{\text{eff}} = 1,464$ , определите необходимый пространственный период  $\Lambda$  брэгговского зеркала.

5. 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.

6. 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.

7. Для волоконного лазера на основе световода из кварцевого стекла, легированного ионами  $\text{Tm}^{3+}$ , с излучением на длине волны  $\lambda = 1850$  нм на основной моде  $\text{HE}_{11}$  с эффективным показателем преломления  $n_{\text{eff}} = 1,465$ , 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  $\Delta n = 5 \times 10^{-5}$  и пространственным периодом  $\Lambda$ , найденным при решении задачи 3.

8. Для волоконного лазера на основе световода из кварцевого стекла, легированного ионами  $\text{Ho}^{3+}$ , с излучением на длине волны  $\lambda = 2000$  нм на основной моде  $\text{HE}_{11}$  с эффективным показателем преломления  $n_{\text{eff}} = 1,464$ , и параметром волокна  $V = 2,2$ , определите коэффициент отражения по интенсивности  $R_I$  брэгговского зеркала с длиной решетки  $l = 4$  мм, амплитудой модуляции показателя преломления  $\Delta n = 2 \times 10^{-5}$  и пространственным периодом  $\Lambda$ , найденным при решении задачи 4.

9. 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  $\Delta n = 3 \times 10^{-5}$ .

10. 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.

### 6.3 Энергетические и временные характеристики волоконных лазеров

#### 6.3.1 Примеры решения задач по теме «Энергетические и временные характеристики волоконных лазеров»

**Задача 1.** Волоконный 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.

**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  $W_p = W_{mean} = P_{out} / f_p = 3,5 \cdot 10^8$  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.** Для волоконного непрерывного лазера с цилиндрической сердцевиной с диаметром  $a = 6$  мкм, генерирующего на основной моде  $HE_{11}$  пучок с длиной волны 1050 нм и выходной мощностью 10 мВт, определите выходную интенсивность излучения.

**Решение.** Используя связь интенсивности с выходной мощностью лазера и площадью выходного пучка, совпадающей с площадью поперечного сечения цилиндрической сердцевины, получаем  $I_{out} = P_{out} / S = P_{out} / (\pi a^2 / 4) = 3,5 \times 10^8$  Вт/м<sup>2</sup> =  $3,5 \times 10^4$  Вт/см<sup>2</sup>.

**Ответ:**  $I_{out} = 3,5 \times 10^8$  Вт/м<sup>2</sup> =  $3,5 \times 10^4$  Вт/см<sup>2</sup>.

#### 6.3.2 Варианты задач для самоподготовки

**1.** Волоконный 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.

**2.** Для волоконного 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.

**3.** Для волоконного непрерывного лазера с цилиндрической сердцевиной с диаметром  $a = 20$  мкм, генерирующего на основной моде



HE<sub>11</sub> пучок с длиной волны 1550 нм и выходной мощностью 1 Вт, определите выходную интенсивность излучения.

4. Для волоконного лазера на одномодовом световоде с цилиндрической сердцевиной, имеющей диаметр  $a = 7$  мкм, генерирующего на основной моде HE<sub>11</sub> пучок с длиной волны 940 нм, сконструируйте линзовую систему для обеспечения дифракционной расходимости выходного излучения 100 мкрад. Ответ поясните рисунком.

5. Для волоконного импульсного лазера с цилиндрической сердцевиной с диаметром  $a = 12$  мкм, генерирующего на основной моде HE<sub>11</sub> пучок с длиной волны 1050 нм, выходной средней мощностью 20 Вт и длительностью импульсов 100 нс, определите импульсную выходную интенсивность излучения.

6. Для волоконного лазера на одномодовом световоде с цилиндрической сердцевиной, имеющей диаметр  $a = 10$  мкм, генерирующего на основной моде HE<sub>11</sub> пучок с длиной волны 1550 нм, сконструируйте линзовую систему для освещения области с поперечным размером 3 м на расстоянии в 5 км. Ответ поясните рисунком.

7. Для волоконного непрерывного лазера с цилиндрической сердцевиной с диаметром  $a = 40$  мкм, генерирующего на основной моде HE<sub>11</sub> пучок с длиной волны 1850 нм и выходной мощностью 20 Вт, определите выходную интенсивность излучения.

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

9. Для волоконного лазера на одномодовом световоде с цилиндрической сердцевиной, имеющей диаметр  $a = 10$  мкм, генерирующего на основной моде HE<sub>11</sub> пучок с длиной волны 2000 нм, сконструируйте линзовую систему для обеспечения дифракционной расходимости выходного излучения 40 мкрад. Ответ поясните рисунком.

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

## 6.4 Измерительные и интерферометрические системы на основе волоконных лазеров

### 6.4.1 Примеры решения задач по теме «Измерительные и интерферометрические системы на основе волоконных лазеров»

**Задача 1.** Две плоские монохроматические волны 1 и 2 с длиной волны  $\lambda = 930$  нм и амплитудами  $E_{m1} = 1$  В/м и  $E_{m2} = 50$  В/м, поляризованные вдоль оси  $Z$ , распространяются в среде с показателем преломления  $n = 2,2$ . Волновые векторы волн  $\vec{k}_1$  и  $\vec{k}_2$  лежат в плоскости  $XU$  и составляют с осью  $+X$  углы  $\theta_1 = 15^\circ$  и  $\theta_2 = -15^\circ$ , соответственно.

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

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

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

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

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

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  $\Lambda = 817$  нм и  $m = 2\sqrt{I_1 I_2} / (I_1 + I_2) = 0,277$ .

**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  $\Lambda = 1174$  нм.

3. Глубина модуляции интенсивности  $m = 0,277$ .

#### 6.4.2 Варианты задач для самоподготовки

1. 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  $E_{1m} = 2$  В/м и  $E_{2m} = 1000$  В/м, в среде с показателем преломления  $n_0$ , не обладающей магнитными свойствами ( $\mu = \mu_0$ ). Определите период интерференционной картины и глубину модуляции интенсивности  $m = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$  для угла  $\theta = 15^\circ$ .

2. Волоконный лазер на основе световода из кварцевого стекла, легированного ионами  $\text{Nd}^{3+}$ , генерирует излучение со средней длиной волны 922 нм в спектральной области шириной  $\Delta\lambda = 10^{-3}$  нм. Определите степень монохроматичности, время и длину когерентности излучения данного лазера.

3. Две плоские световые волны с одинаковыми частотами  $\omega$ , начальными фазами  $\varphi_0 = 0$  и векторами поляризации вдоль оси  $y$  распространяются навстречу друг другу вдоль оси  $z$ . Найдите распределение интенсивности в картине интерференции этих волн, имеющих амплитуды  $E_{1m} = 1200$  В/м и  $E_{2m} = 1000$  В/м, в среде с показателем преломления  $n_0 = 1,465$ , не обладающей магнитными свойствами ( $\mu = \mu_0$ ). Определите период интерференционной картины и глубину модуляции интенсивности  $m = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$ .

4. Волоконный лазер на основе световода из кварцевого стекла, легированного ионами  $\text{Er}^{3+}$ , генерирует излучение со средней длиной волны 1540 нм в спектральной области шириной  $\Delta\lambda = 10^{-2}$  нм. Определите степень монохроматичности, время и длину когерентности излучения данного лазера.

5. Импульсный волоконный лазер на основе световода из кварцевого стекла, легированного ионами  $\text{Ho}^{3+}$ , используется в оптическом дальномере с предельным значением дальности 10 км и разрешающей способностью по дальности 3 м. Определите предельную частоту повторения импульсов и их длительность, при которых обеспечиваются данные характеристики дальномера.

6. Импульсный волоконный лазер на основе световода из кварцевого стекла, легированного ионами  $Tm^{3+}$ , генерирует импульсы с длительностью 100 пс с частотой повторения 10 кГц и используется в лазерном рефлектометре для диагностики волоконно-оптических линий связи с эффективным показателем преломления  $n = 1,465$ . Определите предельную дальность данного рефлектометра и его разрешающую способность по дальности.

7. Реализация лазерного интерферометра, предназначенного для дистанционного измерения амплитуды колебаний объектов, расположенных на расстоянии до 150 м, требует использования волоконного лазера с излучением, имеющим длину когерентности, превышающую 400 м. Определите необходимое значение ширины спектра генерации  $\Delta\lambda$ , которое должен обеспечить на длине волны  $\lambda_0 = 1030$  нм лазер на основе световода из кварцевого стекла, легированного ионами  $Yb^{3+}$ .

8. Импульсный волоконный лазер на основе световода из кварцевого стекла, легированного ионами  $Nd^{3+}$ , генерирует импульсы с длительностью 200 пс с частотой повторения 100 кГц и используется в лазерном рефлектометре для диагностики волоконно-оптических линий связи с эффективным показателем преломления  $n = 1,468$ . Определите предельную дальность данного рефлектометра и его разрешающую способность по дальности.

9. Волоконный лазер на основе световода из кварцевого стекла, легированного ионами  $Nd^{3+}$ , генерирует излучение со средней длиной волны 1340 нм в спектральной области шириной  $\Delta\lambda = 5 \cdot 10^{-3}$  нм. Определите степень монохроматичности, время и длину когерентности излучения данного лазера.

10. Импульсный волоконный лазер на основе световода из кварцевого стекла, легированного ионами  $Er^{3+}$ , используется в оптическом дальномере с предельным значением дальности 15 км и разрешающей способностью по дальности 6 м. Определите предельную частоту повторения импульсов и их длительность, при которых обеспечиваются данные характеристики дальномера.

## 7 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. Технологические головки для волоконных лазеров. Оптическая функция и функции юстировки.

2. Технологические головки для волоконных лазеров. Технологические функции; контроль и безопасность.

3. Функции лазерных головок, обеспечивающие адаптивность процесса.

4. Технологические головки для сварки.
  5. Технологические головки для резки.
  6. Технологические головки для наплавки.
  7. Технологические головки для пайки.
  8. Универсальные технологические головки.
  9. Головки для гибридных технологий.
  10. Технологические головки для закалки.
  11. Волоконные промышленные лазеры компании IPG Photonics.
  12. Лазерная маркировка кремниевых пластин.
  13. Лазерная маркировка металлокерамических корпусов.
  14. Лазерная микрообработка гибких печатных плат.
- Студент защищает реферат по выбранной им теме.

## **8 Подготовка к контрольной работе**

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

1. Волоконные световоды. Элементы волоконных лазеров.
2. Характеристики волоконных лазеров. Волоконные промышленные лазеры и их применение.

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 б).

### **8.1 Теоретические вопросы для письменной контрольной работы по темам «Волоконные световоды. Элементы волоконных лазеров»**

1. Дайте определение понятию «критический угол».
2. Сформулируйте условия существования направляемых мод в световоде в приближениях геометрической оптики и в рамках электромагнитной теории.
3. Чем отличаются ТЕ- и ТМ-моды?
4. Чем отличаются световоды со ступенчатым и с градиентным профилями показателя преломления?
5. 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. Что представляют собой гибридные моды цилиндрического световода?
8. Какие физические явления обусловлены дисперсией, присущей волоконным световодам?

9. В чем преимущество использования градиентных волоконных световодов?

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

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

12. 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. 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. 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.

## **8.2 Теоретические вопросы для письменной контрольной работы по темам «Характеристики волоконных лазеров. Волоконные промышленные лазеры и их применение»**

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

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

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

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

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

6. Какое излучение накачки необходимо использовать для волоконного лазера на основе световодов, легированных  $\text{Er}^{3+}$ ?
7. В каком спектральном диапазоне может генерировать излучение волоконный лазер на основе световодов, легированных  $\text{Tm}^{3+}$ ?
8. Какое излучение накачки необходимо использовать для волоконного лазера на основе световодов, легированных  $\text{Tm}^{3+}$ ?
9. В каком спектральном диапазоне может генерировать излучение волоконный лазер на основе световодов, легированных  $\text{Ho}^{3+}$ ?
10. Какое излучение накачки необходимо использовать для волоконного лазера на основе световодов, легированных  $\text{Ho}^{3+}$ ?
11. Для резки каких листовых материалов, тонких или толстых, использование волоконных лазеров наиболее целесообразно, в сравнении с лазерами на  $\text{CO}_2$ ?
12. Какую мощность должны обеспечивать волоконные лазеры для сварки металлических материалов – мВт или кВт?
13. Какой режим работы лазера, непрерывный или импульсный, используется для лазерной маркировки изделий?
14. Опишите достоинства волоконно-оптических систем лазерной гравировки.
15. Опишите достоинства волоконно-оптических систем лазерной микрообработки.
16. Опишите достоинства волоконно-оптических систем лазерной микропайки и микросварки.
17. Какие особенности конструкции волоконных лазеров обеспечивают большое значение длины когерентности их излучения?
18. Какой вид когерентности играет наиболее важную роль в лазерных интерферометрических системах?
19. По каким причинам свойство временной когерентности лазерного излучения очень важно для голографии?

### **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 волоконном световоде показатель преломления сердцевинки:
  - 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.

3. 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.
4. 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.
5. 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  $EH_{11}$ .
6. 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.
7. 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.
8. 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.

9. 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.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. Типичные выходные мощности промышленных волоконных лазеров на основе световодов, легированных  $\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$ ,  $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Tm}^{3+}$  и  $\text{Ho}^{3+}$  составляют:

- а) десятки МВт;
- б) единицы мкВт;
- в) единицы ГВт;
- г) от единиц мВт до единиц кВт.

15. Достоинством технологических волоконных лазеров является:

- а) доставка излучения с использованием коллимирующих устройств;
- б) доставки излучения с помощью волоконного кабеля необходимой длины (50 м и более);
- в) доставка излучения с использованием фокусирующих устройств;
- г) доставка излучения через атмосферный канал.

16. Использование волоконных лазерных систем резки наиболее целесообразно:

- а) для тонких листовых материалов;
- б) для толстых листовых материалов;
- в) для профилированных материалов;
- г) для пищевых продуктов.

17. Для лазерной маркировки изделий из пластика и металла наиболее целесообразно использование волоконных лазерных систем:

- а) с непрерывным режимом генерации и мощностью 1 мВт;
- б) с импульсным режимом генерации при пиковой мощности порядка 5 кВт, частоте повторения от 20 до 200 кГц и длительности импульсов от 10 до 100 нс;
- в) с непрерывным режимом генерации и мощностью 1 кВт;
- г) с моноимпульсным режимом генерации при энергии импульса 1 мкДж и длительности 1 мс.

18. Для лазерной микрорезки полупроводниковых пластин и электронных компонентов наиболее целесообразно использование волоконных лазерных систем:

- а) вследствие их компактности, высокого качества пучка и доставки излучения с помощью волоконного кабеля необходимой длины;
- б) вследствие большой длины когерентности излучения;
- в) вследствие высокой степени монохроматичности излучения;
- г) вследствие большой длины лазерного резонатора.

19. Для лазерных интерферометрических систем целесообразно использование волоконных лазерных систем с брэгговскими зеркалами:

- а) вследствие высокой степени монохроматичности и большой длины когерентности излучения;
- б) вследствие широкой полосы частот генерируемого излучения;
- в) вследствие малого времени когерентности генерируемого излучения;
- г) вследствие большой длины лазерного резонатора.

20. Для систем лазерной спектроскопии целесообразно использование волоконных лазерных систем с брэгговскими зеркалами:

- а) вследствие широкой полосы частот генерируемого излучения;
- б) вследствие высокой степени монохроматичности генерируемого излучения;
- в) вследствие малого времени когерентности генерируемого излучения;
- г) вследствие большой длины лазерного резонатора.

### **Рекомендуемая литература**

1. 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).

2. 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

3. Курков А.С., Дианов Е.М. Непрерывные волоконные лазеры средней мощности // Квантовая электроника. – 2004. – Т. 34. – № 10. – С. 881–900.

4. 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.

5. Дианов Е.М. Волоконные лазеры // УФН. – 2004. – Т. 174. – № 10. – С. 1139–1142.
6. Othonos A. Fiber Bragg gratings // Rev. Sci. Instruments. – 1997. – V. 68. – No. 12. – P. 4309–4341.
7. Айхлер Ю., Айхлер Г.Н. Лазеры. Исполнение, управление, применение. М.: Техносфера, 2012. – 496 с. ISBN 978-5-94836-309-7.
8. 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).
9. 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>.
10. 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>.
11. Пихтин А.Н. Оптическая и квантовая электроника. Учебник для ВУЗов.- М.: Высшая школа, 2001. – 574 с.
12. Ярив А. Оптические волны в кристаллах / А. Ярив, П. Юх. – М.: Мир, 1987. – 616 с.
13. Звелто О. Принципы лазеров / О. Звелто. – СП-б. : Лань, 2008. – 720 с.
14. Хакен Г. Лазерная светодинамика / Г. Хакен ; пер. с англ. – М. : Мир, 1988. – 350 с.
15. Никоноров Н.В., Шандаров С.М. Волноводная фотоника: Учебное пособие. – СПб.: Издательство СПбГУ ИТМО, 2008 – 142 с.

Учебно-методическое пособие

Шандаров С.М.

Буримов Н.И.

Волоконные лазеры

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