

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор физтех-школы  
электроники, фотоники и  
молекулярной физики**

**В.В. Иванов**

**Рабочая программа дисциплины (модуля)**

<b>по дисциплине:</b>	Физические и математические основы генерации излучения в активных световодах
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: электроника и квантовые технологии Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра фотоники
<b>курс:</b>	4
<b>квалификация:</b>	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 7 (осенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: Р.И. Шайдуллин

Программа обсуждена на заседании кафедры фотоники 29.05.2020

## Аннотация

Курс "Физические и математические основы генерации излучения в активных световодах" предусматривает ознакомление слушателей с физическими принципами генерации и усиления излучения в активных волоконных световодах, основами создания и эксплуатации мощных непрерывных волоконных лазеров.

Задачи курса:

- приобретение студентами теоретических знаний и навыков в области создания и преобразования лазерной генерации в активных оптических световодах;
- подготовка слушателей к изучению смежных дисциплин лазерной физики, радиофизики и теплофизики;
- освоение технологий, применяемых для создания мощных волоконных лазеров и усилителей.

По результатам освоения курса студент должен:

Знать:

- ☐ основные понятия волоконной оптики и лазерной физики
- ☐ основные элементы конструкции непрерывных волоконных лазеров
- ☐ свойства редкоземельных ионов, используемых для создания активной среды
- ☐ основные механизмы разогрева в активной лазерной среде

"

Уметь:

- ☐ рассчитывать основные параметры активных оптических световодов и интегральных волоконно-оптических компонент, необходимых для создания лазера с требуемыми характеристиками
- ☐ рассчитывать коэффициенты усиления и инверсии в активной среде
- ☐ определять количество пространственных мод волоконного лазера

Владеть:

- ☐ теорией распространения и преобразования оптического излучения в активном волокне
- ☐ методами математического моделирования тепловых процессов в активном волокне в условиях преобразования лазерного излучения
- ☐ знаниями о проблемах генерации мощного лазерного излучения в оптических световодах

Основное содержание курса изложено в следующих разделах:

1. Основные понятия лазерной физики
2. Принципы создания и работы волоконного лазера
3. Свойства редкоземельных ионов, используемых для создания активной среды волоконного лазера
4. Компоненты интегральной волоконной оптики
5. Полупроводниковые лазерные диоды, используемые для накачки волоконных лазеров
6. Методы расчета рабочих параметров волоконного лазера
7. Тепловые эффекты в волоконных лазерах
8. Нелинейные эффекты в волоконных лазерах. Рэлеевское рассеяние, ВКР, ВРМБ
9. Типы полимеров, используемых для покрытия оптических световодов и их спектральные свойства
10. Радиочастотная импедансная спектроскопия оптических волокон
11. Методы определения конвективного коэффициента теплообмена оптического волокна с окружающей средой
12. Физическое и математическое моделирование разогрева активного волокна

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

- ознакомление слушателей с физическими принципами генерации и усиления излучения в активных волоконных световодах, основами создания и эксплуатации мощных непрерывных волоконных лазеров.

### Задачи дисциплины

- приобретение студентами теоретических знаний и навыков в области создания и преобразования лазерной генерации в активных оптических световодах;
- подготовка слушателей к изучению смежных дисциплин лазерной физики, радиофизики и теплофизики;
- освоение технологий, применяемых для создания мощных волоконных лазеров и усилителей.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	УК-1.1 Анализирует задачу, выделяя этапы ее решения, действия по решению задачи
	УК-1.3 Рассматривает различные варианты решения задачи, оценивает их преимущества и недостатки
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики
	ПК-1.4 Умеет строить математические модели для описания и исследования процессов и явлений в соответствующих научных областях
	ПК-1.2 Имеет глубокое знание и понимание базовых математических дисциплин

## 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- ☐ основные понятия волоконной оптики и лазерной физики;
- ☐ основные элементы конструкции непрерывных волоконных лазеров;
- ☐ свойства редкоземельных ионов, используемых для создания активной среды;
- ☐ основные механизмы разогрева в активной лазерной среде.

уметь:

- ☐ рассчитывать основные параметры активных оптических световодов и интегральных волоконно-оптических компонент, необходимых для создания лазера с требуемыми характеристиками;
- ☐ рассчитывать коэффициенты усиления и инверсии в активной среде;
- ☐ определять количество пространственных мод волоконного лазера.

владеть:

- ☐ теорией распространения и преобразования оптического излучения в активном волокне;
- ☐ методами математического моделирования тепловых процессов в активном волокне в условиях преобразования лазерного излучения;
- ☐ знаниями о проблемах генерации мощного лазерного излучения в оптических световодах.

## 4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост.

		лекции	семинары	лаборат. работы	работа
1	Основные понятия лазерной физики	2	2		3
2	Принципы создания и работы волоконного лазера	2	2		3
3	Свойства редкоземельных ионов, используемых для создания активной среды волоконного лазера	2	2		2
4	Компоненты интегральной волоконной оптики	2	2		2
5	Полупроводниковые лазерные диоды, используемые для накачки волоконных лазеров	2	2		2
6	Методы расчета рабочих параметров волоконного лазера	2	2		2
7	Тепловые эффекты в волоконных лазерах	4	4		2
8	Нелинейные эффекты в волоконных лазерах. Рэлеевское рассеяние, ВКР, ВРМБ	2	2		3
9	Типы полимеров, используемых для покрытия оптических световодов и их спектральные свойства	4	4		2
10	Радиочастотная импедансная спектроскопия оптических волокон	2	2		3
11	Методы определения конвективного коэффициента теплообмена оптического волокна с окружающей средой	2	2		3
12	Физическое и математическое моделирование разогрева активного волокна	4	4		3
Итого часов		30	30		30
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

#### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 7 (Осенний)

##### 1. Основные понятия лазерной физики

1.1. Квантовая природа света. Соотношения Эйнштейна. Принципы создания инверсной заселенности и индуцированного излучения. Селективные элементы лазера.

1.2 Типы лазеров и области их применения.

##### 2. Принципы создания и работы волоконного лазера

2.1 Активные и пассивные оптические волокна. Одномодовые и многомодовые режимы излучения. Методы ввода оптической накачки в волокно.

2.2 Создание активной среды волоконного лазера.

2.3 Создание резонатора. Волоконные брэгговские решетки.

3. Свойства редкоземельных ионов, используемых для создания активной среды волоконного лазера

3.1 Энергетические уровни электронных состояний ионов иттербия. Сечения поглощения и люминесценции. Температурная зависимость этих сечений.

3.2 Энергетические уровни электронных состояний ионов эрбия. Иттербий-эрбиевая лазерная среда. Механизм кросс-релаксации.

3.3 Свойства других редкоземельных ионов: тулий, неодим.

4. Компоненты интегральной волоконной оптики

4.1 Волоконно-оптические ответвители и объединители.

4.2 Волоконно-оптические изоляторы. Эффект Фарадея.

4.3 Волоконные WDM-фильтры.

5. Полупроводниковые лазерные диоды, используемые для накачки волоконных лазеров

5.1 Полупроводниковые лазерные диоды на двойной гетероструктуре.

5.2 Свойства полупроводниковых структур на основе арсенида галлия.

6. Методы расчета рабочих параметров волоконного лазера

6.1 Определение порога генерации и эффективности преобразования волоконного лазера.

6.2 Расчет коэффициентов усиления и инверсии в активной среде.

6.3 Оценка числа пространственных мод в резонаторе.

6.4 Расчет энергии лазерных импульсов.

7. Тепловые эффекты в волоконных лазерах

7.1 Основные механизмы разогрева активного оптического волокна.

7.2 Теоретический расчет величины разогрева на основе решения уравнения теплопроводности.

7.3 Тепловые эффекты в активной среде волоконного лазера.

7.4 Оценки предельных мощностей в волоконных лазерах.

7.5 Экспериментальные методики измерения температуры в волокне.

8. Нелинейные эффекты в волоконных лазерах. Рэлеевское рассеяние, ВКР, ВРМБ

8.1 Взаимодействие оптического излучения со средой.

8.2 Поглощение и рассеяние излучения в среде.

8.3 Вынужденное комбинационное рассеяние, вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна.

9. Типы полимеров, используемых для покрытия оптических световодов и их спектральные свойства

9.1 Основные классы полимеров, используемых в волоконной оптике.

9.2 Полидиметилсилоксаны (PDMS) и их механические, оптические и тепловые свойства.

9.3 Температурные зависимости диэлектрической проницаемости и показателя преломления полимеров.

9.4 Температурные зависимости оптических спектров полимеров.

10. Радиочастотная импедансная спектроскопия оптических волокон

10.1. Основные принципы и области применения метода радиочастотной импедансной спектроскопии.

10.2. Методика измерения температуры оптического волокна в условиях генерации и усиления мощного оптического излучения, основанная на методе радиочастотной импедансной спектроскопии.

11. Методы определения конвективного коэффициента теплообмена оптического волокна с окружающей средой

11.1. Уравнение теплопроводности. Значение коэффициента теплообмена для расчета температурного распределения.

11.2. Эмпирические формулы для расчета конвективного коэффициента теплообмена.

11.3. Число Био и закон Ньютона-Рихмана.

11.4. Экспериментальные методы определения конвективного коэффициента теплообмена оптического волокна с окружающей средой.

12. Физическое и математическое моделирование разогрева активного волокна

12.1. Физическое моделирование разогрева оптического волокна и расчет конвективного коэффициента теплообмена полимерной оболочки с окружающей средой.

12.2. Создание модели оптического волокна в математическом пакете COMSOL Multiphysics. Геометрическое разбиение и метод конечных элементов.

12.3. Задание физических свойств материалов, модельных уравнений и граничных условий.

12.4. Расчет температурных полей в волокне с варьированием параметров и использованием различных моделей разогрева.

## **5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)**

учебная аудитория, оснащенная компьютером и мультимедийным оборудованием (проектор, звуковая система).

## **6. Перечень рекомендуемой литературы**

### **Основная литература**

1. Дмитриев В.Г., Тарасов Л.В., Прикладная нелинейная оптика / 2-е издание М.: Физматлит, 2004.
2. Пихтин А.Н. Оптическая и квантовая электроника. М.: Высшая школа, 2001.
3. Блистанов А.А., Кристаллы квантовой и нелинейной оптики / М.: «Мисис», 2000.
4. Иванов А.Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения. М.: САЙРУС-СИСТЕМС, 1999.

### **Дополнительная литература**

1. Шур М. Физика полупроводниковых приборов. В 2-х томах. Пер. с англ. М.: Мир, 1992.
2. Ж. И. Алферов. «Двойные гетероструктуры: концепции и применения в физике, электронике и технологии» // УФН, Т.172, № 9, с.1068-1086, 2002.

## **7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)**

1. <http://www.opticsinfobase.org>
2. <http://www.elsevier.com>

3. <http://www.sciencedirect.com>

4. <http://www.elibrary.ru>

**8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

на лекционных занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций.

**9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

- 1) посещение всех лекций и семинаров, предусмотренных учебным планом; ведение конспектов занятий; активное участие в обсуждении лекций и семинаров;
- 2) важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультацией к преподавателю на лекции или к докладчику на семинаре.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: электроника и квантовые технологии Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра фотоники
<b>курс:</b>	4
<b>квалификация:</b>	бакалавр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 7 (осенний) - Дифференцированный зачет	
<b>Разработчик:</b>	Р.И. Шайдуллин



## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	УК-1.1 Анализирует задачу, выделяя этапы ее решения, действия по решению задачи
	УК-1.3 Рассматривает различные варианты решения задачи, оценивает их преимущества и недостатки
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики
	ПК-1.4 Умеет строить математические модели для описания и исследования процессов и явлений в соответствующих научных областях
	ПК-1.2 Имеет глубокое знание и понимание базовых математических дисциплин

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Физические и математические основы генерации излучения в активных световодах» обучающийся должен:

### знать:

- ☐ основные понятия волоконной оптики и лазерной физики;
- ☐ основные элементы конструкции непрерывных волоконных лазеров;
- ☐ свойства редкоземельных ионов, используемых для создания активной среды;
- ☐ основные механизмы разогрева в активной лазерной среде.

### уметь:

- ☐ рассчитывать основные параметры активных оптических световодов и интегральных волоконно-оптических компонент, необходимых для создания лазера с требуемыми характеристиками;
- ☐ рассчитывать коэффициенты усиления и инверсии в активной среде;
- ☐ определять количество пространственных мод волоконного лазера.

### владеть:

- ☐ теорией распространения и преобразования оптического излучения в активном волокне;
- ☐ методами математического моделирования тепловых процессов в активном волокне в условиях преобразования лазерного излучения;
- ☐ знаниями о проблемах генерации мощного лазерного излучения в оптических световодах.

## 3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия по теме прошлой лекции или в конце занятия по пройденной теме.

## 4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Вопросы для подготовки к дифференцированному зачету:

1. Основные понятия лазерной физики
2. Принципы создания и работы волоконного лазера
3. Свойства редкоземельных ионов, используемых для создания активной среды волоконного лазера
4. Компоненты интегральной волоконной оптики
5. Полупроводниковые лазерные диоды, используемые для накачки волоконных лазеров
6. Методы расчета рабочих параметров волоконного лазера
7. Тепловые эффекты в волоконных лазерах

8. Нелинейные эффекты в волоконных лазерах. Рэлеевское рассеяние, ВКР, ВРМБ
9. Типы полимеров, используемых для покрытия оптических световодов и их спектральные свойства
10. Радиочастотная импедансная спектроскопия оптических волокон
11. Методы определения конвективного коэффициента теплообмена оптического волокна с окружающей средой
12. Физическое и математическое моделирование разогрева активного волокна

#### Критерии оценивания

10 баллов — (ПРЕВОСХОДНО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы, а также по основным вопросам, выходящим за ее пределы;
- точное использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы;
- безупречное владение инструментарием учебной дисциплины, умение его эффективно использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;
- выраженная способность самостоятельно и творчески решать сложные проблемы в нестандартной ситуации;
- полное и глубокое усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку, использовать научные достижения других дисциплин;
- творческая самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, активное участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

9 баллов — (ОТЛИЧНО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы;
- точное использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его эффективно использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;
- способность самостоятельно и творчески решать сложные проблемы в нестандартной ситуации в рамках учебной программы, полное усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку;
- самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, творческое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

8 баллов — (ПОЧТИ ОТЛИЧНО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем поставленным вопросам в объеме учебной программы;
- использование научной терминологии, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины (методами комплексного анализа, техникой информационных технологий), умение его использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач; способность самостоятельно решать сложные проблемы в рамках учебной программы;
- усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку с позиций государственной идеологии (по дисциплинам социально-гуманитарного цикла);
- активная самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, систематическое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

7 баллов — (ОЧЕНЬ ХОРОШО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы;
- использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), лингвистически и логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы;

- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;
- усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку;
- самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

6 баллов — (ХОРОШО):

- достаточно полные и систематизированные знания в объеме учебной программы;
- использование необходимой научной терминологии, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении учебных и профессиональных задач; способность самостоятельно применять типовые решения в рамках учебной программы;
- усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в базовых теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им сравнительную оценку; активная самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, периодическое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

5 баллов — (ПОЧТИ ХОРОШО):

- достаточные знания в объеме учебной программы;
- использование научной терминологии, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении учебных и профессиональных задач;
- способность самостоятельно применять типовые решения в рамках учебной программы;
- усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в базовых теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им сравнительную оценку;
- самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

4 балла — (УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО), ЗАЧТЕНО:

- достаточный объем знаний в рамках образовательного стандарта;
- усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- использование научной терминологии, стилистическое и логическое изложение ответа на вопросы, умение делать выводы без существенных ошибок;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении стандартных (типовых) задач;
- умение под руководством преподавателя решать стандартные (типовые) задачи;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им оценку;
- работа под руководством преподавателя на практических, лабораторных занятиях, допустимый уровень культуры исполнения заданий.

3 балла — (НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО), НЕЗАЧТЕНО:

- недостаточно полный объем знаний в рамках образовательного стандарта;
- знание части основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- использование научной терминологии, изложение ответа на вопросы с существенными лингвистическими и логическими ошибками;
- слабое владение инструментарием учебной дисциплины, некомпетентность в решении стандартных (типовых) задач;
- неумение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях изучаемой дисциплины;
- пассивность на практических и лабораторных занятиях, низкий уровень культуры исполнения заданий.

2 балла — (НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО):

- фрагментарные знания в рамках образовательного стандарта;

- знания отдельных литературных источников, рекомендованных учебной программой дисциплины;
- неумение использовать научную терминологию дисциплины, наличие в ответе грубых стилистических и логических ошибок;
- пассивность на практических и лабораторных занятиях, низкий уровень культуры исполнения заданий.

1 балл — (НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО):

- отсутствие знаний и компетенций в рамках образовательного стандарта или отказ от ответа.

## **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

При проведении дифференцированного зачета обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету не должен превышать двух астрономических часов в устной и (или) письменной форме.