

**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**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Физика твердотельных и волоконных лазеров
<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>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

1 (осенний) - Экзамен

2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 15 час.

семинары: 45 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 60 час.

Подготовка к экзамену: 60 час.

Всего часов: 180, всего зач. ед.: 4

Программу составил: Д.В. Мясников, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры фотоники 29.05.2020

## **Аннотация**

Курс "Физика твердотельных и волоконных лазеров" предусматривает углубление и систематизацию знаний физики твердотельных и волоконных лазеров.

Задачи курса:

- дать студентам необходимые знания физики твердотельных и волоконных лазеров;
- сформировать у студентов склонность к самостоятельному решению задач физики волоконных лазеров аналитическими и численными методами;
- способствовать скорейшему вовлечению студентов в разработки, выполняемые в базовой организации.

По результатам освоения курса студент должен:

Знать:

Основные типы лазеров и их применения; подходы к описанию взаимодействия излучения с веществом; спектроскопические свойства основных активных сред, используемых в волоконных лазерах; механизмы уширения линии перехода в различных средах; способы описания динамики лазерного излучения, основные динамические уравнения; методы создания инверсии населённостей в активных средах лазеров; влияние и способ описания шумов в оптических усилителях; оптику гауссовых пучков, описание качества пучка лазерного излучения; переходные процессы в лазерах, релаксационные колебания; механизмы получения ультракоротких импульсов в лазерах; нелинейные эффекты, возникающие в волоконных лазерах.

Уметь:

Рассчитывать параметры резонаторов волоконных лазеров; моделировать усиление непрерывных и импульсных сигналов в оптическом усилителе; измерять сечения поглощения и люминесценции в волоконных световодах, легированных редкоземельными ионами.

Владеть:

Методами математического моделирования.

Основное содержание курса изложено в следующих разделах:

1. Обзор основных типов лазеров.
2. Взаимодействие излучения с веществом. Спонтанные и вынужденные переходы.
3. Спектроскопия активной среды.
4. Усиление и поглощение в активной среде
5. Лазерная генерация.
6. Резонаторы твердотельных и волоконных лазеров.
7. Резонаторы твердотельных и волоконных лазеров.
8. Оптика гауссовых пучков.
9. Шумы квантового усилителя.
10. Основные явления динамики лазеров.
11. Нелинейные эффекты в волоконных лазерах

## **1. Цели и задачи**

### **Цель дисциплины**

- углубление и систематизация знаний физики твердотельных и волоконных лазеров.

### **Задачи дисциплины**

- дать студентам необходимые знания физики твердотельных и волоконных лазеров;

- сформировать у студентов склонность к самостоятельному решению задач физики волоконных лазеров аналитическими и численными методами;
- способствовать скорейшему вовлечению студентов в разработки, выполняемые в базовой организации.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

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

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

основные типы лазеров и их применения; подходы к описанию взаимодействия излучения с веществом; спектроскопические свойства основных активных сред, используемых в волоконных лазерах; механизмы уширения линии перехода в различных средах; способы описания динамики лазерного излучения, основные динамические уравнения; методы создания инверсии населённости в активных средах лазеров; влияние и способ описания шумов в оптических усилителях; оптику гауссовых пучков, описание качества пучка лазерного излучения; переходные процессы в лазерах, релаксационные колебания; механизмы получения ультракоротких импульсов в лазерах; нелинейные эффекты, возникающие в волоконных лазерах.

уметь:

рассчитывать параметры резонаторов волоконных лазеров; моделировать усиление непрерывных и импульсных сигналов в оптическом усилителе; измерять сечения поглощения и люминесценции в волоконных световодах, легированных редкоземельными ионами.

владеть:

методами математического моделирования.

## 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. работа
1	Обзор основных типов лазеров		4		5
2	Взаимодействие излучения с веществом. Спонтанные и вынужденные переходы		4		5
3	Спектроскопия активной среды		4		5

4	Усиление и поглощение в активной среде		6		10
5	Лазерная генерация		6		5
6	Резонаторы твердотельных и волоконных лазеров.		6		
7	Резонаторы твердотельных и волоконных лазеров.	2	2		5
8	Оптика гауссовых пучков.	2	2		5
9	Шумы квантового усилителя.	3	3		8
10	Основные явления динамики лазеров	3	3		7
11	Нелинейные эффекты в волоконных лазерах	5	5		5
Итого часов		15	45		60
Подготовка к экзамену		60 час.			
Общая трудоёмкость		180 час., 4 зач.ед.			

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

### Семестр: 1 (Осенний)

#### 1. Обзор основных типов лазеров

##### 1.1. Основные этапы развития квантовой электроники

1.2. Обзор основных на сегодняшний день типов лазеров: активная среда, конфигурация резонатора, длина волны излучения, режимы работы, применения

#### 2. Взаимодействие излучения с веществом. Спонтанные и вынужденные переходы

##### 2.1. Спонтанные и вынужденные переходы. Коэффициенты Эйнштейна. Сечения переходов

2.2. Формула Планка для теплового излучения. Пространственная и временная когерентность излучения

2.2. Квантовомеханическая интерпретация спонтанного излучения атома (связь коэффициентов Эйнштейна с дипольными матричными элементами)

#### 3. Спектроскопия активной среды

3.1. Спектроскопия активной среды. Однородное и неоднородное уширение линий переходов, форма линии. Спектральные термы атомов, правила отбора для излучения

3.2. Дисперсия показателя преломления активной среды: формула Лорентц-Лоренца, соотношение Крамерса-Кронига, коэффициенты Зельмеера

3.3. Спектроскопия активной среды волоконных лазеров (активаторы  $\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$ ,  $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Tm}^{3+}$ )

#### 4. Усиление и поглощение в активной среде

4.1. Закон Бутера-Ламберта. Сечения переходов. Связь сечений поглощения и люминесценции (теория МакКамбера). Скоростные уравнения для инверсии населённостей и для потока фотонов

4.2. Режимы работы усилителя: режим усиления слабого сигнала и режим насыщения. Интенсивность насыщения. Шум-фактор усилителя. Импульсный режим работы усилителя: энергия насыщения, модель Франца-Нодвика

#### 5. Лазерная генерация

- 5.1. Методы создания инверсии населённости. Открытые и закрытые резонаторы. Порог генерации, пороговая и стационарная инверсия
- 5.2. Распределение мощности излучения по длине резонатора. Зависимость выходной мощности от прозрачности выходного зеркала. Гауссов пучок
- 5.3. Одномодовый и многомодовый режимы генерации. Усиление спонтанной люминесценции
- 6. Резонаторы твердотельных и волоконных лазеров.
- 6.1 Резонаторы с прямоугольным и сферическими зеркалами. Время жизни фотона в резонаторе. Спектр пропускания и добротность резонатора (эталоны) Фабри-Перо

## Семестр: 2 (Весенний)

- 7. Резонаторы твердотельных и волоконных лазеров.
- 7.1. Продольные и поперечные моды. Устойчивость резонаторов. Лазеры с распределённой обратной связью
- 8. Оптика гауссовых пучков.
- 8.1 Оптика гауссовых пучков. Эрмит-гауссовы пучки. Преобразование гауссовых пучков оптическими элементами
- 8.2 Перетяжка, кривизна волнового фронта, глубина фокуса линзы. Пространственное преобразование Фурье и формализм ABCD-матрицы
- 8.3 Дифракция эрмит-гауссовых пучков основного и высших порядков в дальнем поле. Параметры качества пучка BPP (Beam Parameter Product) и M2 («Эм-квадрат», «M squared»). Волоконный лазер как преобразователь качества излучения
- 9. Шумы квантового усилителя.
- 9.1 Шумы квантового усилителя. Шумы волоконных лазеров и усилителей
- 10. Основные явления динамики лазеров
- 10.1 Релаксационные колебания. Методы модуляции добротности и синхронизации мод
- 11. Нелинейные эффекты в волоконных лазерах
- 11.1. Нелинейная восприимчивость для квадратичных по полю взаимодействий. Влияние симметрии кристалла и расчёты  $d_{eff}$
- 11.2. Генерация суммарных частот. Фазовый синхронизм для I и II типов взаимодействий. Квазисинхронизм в кристаллах с регулярной доменной структурой
- 11.3. Вынужденное комбинационное рассеяние и вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна

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

учебная аудитория, оснащенная мультимедиа проектором, экраном и микрофоном.

## 6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Н.В. Карлов. Лекции по квантовой электронике. М.: Наука, 1988.
2. А.Н. Пихтин. Оптическая и квантовая электроника. М.: Высшая школа, 2001.
3. Г. Агравал. «Нелинейная волоконная оптика», М.: Мир, 1998
4. P. W. Milonni, J.H. Eberley. Laser Physics. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey. 2010.

#### Дополнительная литература

1. Г. Хакен. «Лазерная светодинамика». М.: «Мир», 1988.
2. В.Г. Дмитриев, Л.В. Тарасов. «Прикладная нелинейная оптика». М.: «Физматлит», 2004.

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

1. <http://www.opticsinfobase.org>
2. <http://www.elibrary.ru>
3. <http://www.elsevier.com>
4. <http://www.sciencedirect.com>

### **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 и семинарских занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций.

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

Студент, прослушавший курс лекций и семинаров должен овладеть общим понятийным аппаратом и научиться применять теоретические знания на практике.

Успешное освоение курса требует:

- 1) посещения 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>	1
<b>квалификация:</b>	магистр
Семестры, формы промежуточной аттестации:	
1 (осенний) - Экзамен	
2 (весенний) - Экзамен	
<b>Разработчик:</b>	Д.В. Мясников, канд. физ.-мат. наук

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Физика твердотельных и волоконных лазеров» обучающийся должен:

### знать:

основные типы лазеров и их применения; подходы к описанию взаимодействия излучения с веществом; спектроскопические свойства основных активных сред, используемых в волоконных лазерах; механизмы уширения линии перехода в различных средах; способы описания динамики лазерного излучения, основные динамические уравнения; методы создания инверсии населённостей в активных средах лазеров; влияние и способ описания шумов в оптических усилителях; оптику гауссовых пучков, описание качества пучка лазерного излучения; переходные процессы в лазерах, релаксационные колебания; механизмы получения ультракоротких импульсов в лазерах; нелинейные эффекты, возникающие в волоконных лазерах.

### уметь:

рассчитывать параметры резонаторов волоконных лазеров; моделировать усиление непрерывных и импульсных сигналов в оптическом усилителе; измерять сечения поглощения и люминесценции в волоконных световодах, легированных редкоземельными ионами.

### владеть:

методами математического моделирования.

## 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 экзамену:

1. Обзор основных типов лазеров.
2. Взаимодействие излучения с веществом. Спонтанные и вынужденные переходы.
3. Спектроскопия активной среды.
4. Усиление и поглощение в активной среде
5. Лазерная генерация.
6. Резонаторы твердотельных и волоконных лазеров.
7. Оптика гауссовых пучков.
8. Шумы квантового усилителя.
9. Основные явления динамики лазеров.

## 10. Нелинейные эффекты в волоконных лазерах.

Примеры экзаменационных билетов.

Пример 1.

1. Усиление и поглощение в активной среде
2. Лазерная генерация.

Пример 2.

1. Шумы квантового усилителя.
2. Основные явления динамики лазеров.

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 экзамена обучающемуся предоставляется до 60 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету не должен превышать двух астрономических часов в устной и (или) письменной форме.