

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНЫХ И ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

КАФЕДРА ЛАЗЕРНОЙ ФИЗИКИ

ОДОБРЕНО УМС ЛАПЛАЗ

Протокол № 1/08-577

от 29.08.2024 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

ВОЛОКОННЫЕ ЛАЗЕРЫ

Направление подготовки  
(специальность)

[1] 12.04.03 Фотоника и оптоинформатика

Семестр	Трудоемкость, кред.	Общий объем курса, час.	Лекции, час.	Практич. занятия, час.	Лаборат. работы, час.	В форме практической подготовки/ В	СРС, час.	КСР, час.	Форма(ы) контроля, экз./зач./КР/КП
2	3	108	7	23	0		42	0	Э
Итого	3	108	7	23	0	0	42	0	

## АННОТАЦИЯ

Цель освоения учебной дисциплины Волоконные лазеры - ознакомить студентов с основными физическими идеями и методами лазерной физики и волоконной оптики, изложить общие подходы при описании радиофизических и оптических явлений, конкретные решения и предельно достижимые характеристики волоконных лазеров.

В курсе излагаются вопросы создания, исследования и применения волоконных лазеров. Рассмотрены свойства волоконных световодов, легированных ионами ряда редкоземельных элементов, способы изготовления световодов с двойной оболочкой, а также методы формирования и свойства внутриволоконных брэгговских решеток, используемых в качестве селективных отражателей. Приведены основные схемы накачки лазеров на основе активных световодов, активированных ионами неодима, иттербия, эрбия, тулия и гольмия. Рассмотрены принципы построения ВКР-конвертеров лазерного излучения на основе волоконных световодов различного состава.

### 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Целью изучения дисциплины «Волоконные лазеры» является формирование у магистрантов навыков необходимых для успешной научной и профессиональной деятельности в различных областях лазерной физики и волоконной оптики, а также овладение математическим аппаратом, применяемым для постановки и аналитического решения физических задач в области волоконных лазеров.

### 2. МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО

Дисциплина логически и содержательно-методически связана со следующими разделами лазерной физики: взаимодействие лазерного излучения, процессы накачки, оптические резонаторы, непрерывный и импульсный режимы работы лазеров, свойства лазерных пучков.

Освоение данной дисциплины необходимо для овладения теоретической базой и экспериментальными методами применения волоконных лазеров для решения современных проблем лазерной технологии – от разработки теоретических основ до формирования практических рекомендаций по эффективному использованию лазерного излучения, а также созданию новых технологических процессов лазерной обработки.

### 3. ФОРМИРУЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ И ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

Универсальные и(или) общепрофессиональные компетенции:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции
--------------------------------	--

Профессиональные компетенции в соответствии с задачами и объектами (областями знаний) профессиональной деятельности:

Задача профессиональной деятельности (ЗПД)	Объект или область знания	Код и наименование профессиональной компетенции; Основание (профессиональный стандарт-ПС, анализ опыта)	Код и наименование индикатора достижения профессиональной компетенции
научно-исследовательский			
<p>формулирование задачи и плана научного исследования в области фотоники и оптоинформатики; построение математических моделей объектов исследования и выбор численного метода их моделирования, разработка алгоритма решения задачи; выполнение математического (компьютерного) моделирования и оптимизации параметров объектов фотоники и оптоинформатики; исследование элементов, устройств и систем фотоники и оптоинформатики; выбор оптимального метода и разработка программ экспериментальных исследований и измерений с выбором технических средств и обработкой результатов; осуществление наладки, настройки и опытной проверки отдельных видов систем фотоники и оптоинформатики в лабораторных условиях; составление описаний проводимых исследований,</p>	<p>фундаментальные и прикладные научно-исследовательские разработки в области фотоники и оптоинформатики;</p>	<p>ПК-1.5 [1] - способен использовать знания о современных разработках и основных применениях лазеров, о физических основах и возможностях лазерной диагностики сред, особенностях взаимодействия лазерного излучения с биотканями и наноструктурами в профессиональной деятельности</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 29.004</p>	<p>З-ПК-1.5[1] - Знать: современное состояние разработок и область применения лазеров, современные возможности лазерной диагностики различных сред; У-ПК-1.5[1] - Уметь: использовать знания о современных разработках и основных применениях лазеров, о физических основах и возможностях лазерной диагностики сред, особенностях взаимодействия лазерного излучения с биотканями и наноструктурами в профессиональной деятельности; В-ПК-1.5[1] - Владеть: навыками сравнительного анализа разработок лазеров, методов лазерной диагностики сред</p>

подготовка данных для составления отчетов, обзоров и другой технической документации; защита приоритета и новизны полученных результатов исследований с использованием юридической базы для охраны интеллектуальной собственности			
формулирование задачи и плана научного исследования в области фотоники и оптоинформатики; построение математических моделей объектов исследования и выбор численного метода их моделирования, разработка алгоритма решения задачи; выполнение математического (компьютерного) моделирования и оптимизации параметров объектов фотоники и оптоинформатики; исследование элементов, устройств и систем фотоники и оптоинформатики; выбор оптимального метода и разработка программ экспериментальных исследований и измерений с выбором технических средств и обработкой результатов; осуществление наладки, настройки и опытной проверки отдельных видов	фундаментальные и прикладные научно-исследовательские разработки в области фотоники и оптоинформатики;	ПК-1.6 [1] - способен ставить задачи и проводить экспериментальные исследования в области взаимодействия излучения с веществом, исследовать оптические свойства материалов, наноструктур и конденсированных сред  <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 29.004	З-ПК-1.6[1] - Знать: оптические свойства материалов, наноструктур и конденсированных сред; У-ПК-1.6[1] - Уметь: проводить экспериментальные исследования в области взаимодействия излучения с веществом, исследования оптические свойства материалов; В-ПК-1.6[1] - Владеть: навыками постановки задач при проведении экспериментальных исследований в области взаимодействия излучения с веществом, при исследовании оптических свойств материалов

систем фотоники и оптоинформатики в лабораторных условиях; составление описаний проводимых исследований, подготовка данных для составления отчетов, обзоров и другой технической документации; защита приоритета и новизны полученных результатов исследований с использованием юридической базы для охраны интеллектуальной собственности			
проектно-конструкторский			
анализ состояния научно-технической проблемы, постановка цели и задач проектирования приборов и систем фотоники и оптоинформатики; разработка функциональных и структурных схем приборов и систем фотоники и оптоинформатики и установление технических требований на отдельные блоки и элементы; проектирование и конструирование различных типов оптических и оптоинформационных систем, блоков и узлов с использованием средств компьютерного проектирования, проведение проектных расчетов и технико-	элементная база полупроводниковых, волоконных и планарных лазеров; элементная база и системы преобразования и отображения информации; устройства и системы на основе когерентной оптики и голографии; устройства и системы компьютерной фотоники; системы оптических и квантовых вычислений и оптические компьютеры; элементная база, системы и методы, обеспечивающие оптическую передачу, прием, обработку, запись и хранение информации;	ПК-4 [1] - способен к разработке функциональных и структурных схем фотоники и оптоинформатики на уровне узлов, элементов, систем и технологий  <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.011	З-ПК-4[1] - Знать: физические принципы действия устройств и систем фотоники и оптоинформатики ; У-ПК-4[1] - Уметь: проводить сравнительный анализ изделий-аналогов; формулировать технические требования на отдельные узлы, элементы, системы и технологии ; разрабатывать и исследовать новые способы и принципы функционирования оптических и оптико-электронных приборов и систем получения, хранения и обработки информации ; В-ПК-4[1] - Владеть: методами анализа и расчета ожидаемых параметров

экономическим обоснованием конструкторских решений; оценка технологичности конструкторских решений, разработка технологических процессов сборки и контроля элементов, устройств и систем; составление технической документации, включая инструкции по эксплуатации, программы испытаний, технические условия; участие в наладке, испытаниях и сдаче в эксплуатацию опытных образцов.			разрабатываемых приборов и систем фотоники и оптоинформатики
производственно-технологический			
разработка и внедрение технологических процессов, методик контроля качества элементов, устройств и систем фотоники и оптоинформатики; разработка и внедрение информационных технологий и оптимизация автоматизированных режимов работы элементов, устройств и систем фотоники и оптоинформатики; разработка и внедрение информационных технологий обработки, преобразования, отображения и хранения информации на основе элементов, устройств и систем фотоники и оптоинформатики; оценка экономической эффективности технологических	элементная база, материалы и технологии, обеспечивающие оптическую передачу, прием, обработку, запись и хранение информации; элементная база, системы и технологии интегральной, волоконной и град и-ентной оптики, а также микрооптики;	ПК-9 [1] - способен к проектированию, разработке и внедрению технологических процессов и режимов производства, контролю качества систем фотоники и их элементов  <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.037	3-ПК-9[1] - Знать: типичные требования, предъявляемые к качеству систем фотоники и их элементов; основные технологические процессы и режимы производства, используемые при изготовлении систем фотоники и их элементов ; У-ПК-9[1] - Уметь: анализировать технические требования, предъявляемые к разрабатываемым технологическим процессам и режимам производства, к контролю качества систем фотоники и их элементов; проводить концептуальную

процессов.			проработку типовых технологических процессов и режимов производства; формулировать и обосновывать параметры, режимы и условия реализации разрабатываемых технологических процессов ; В-ПК-9[1] - Владеть: методами оценки эффективности разрабатываемых и внедряемых технологических процессов и режимов производства
------------	--	--	---

#### 4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Разделы учебной дисциплины, их объем, сроки изучения и формы контроля:

№ п.п	Наименование раздела учебной дисциплины	Недели	Лекции/ Практик. (семинары )/ Лабораторные работы, час.	Обязат. текущий контроль (форма*, неделя)	Максимальный балл за раздел**	Аттестация раздела (форма*, неделя)	Индикаторы освоения компетенции
	<i>2 Семестр</i>						
1	Часть 1	1-8	4/12/0		25	T-8	3-ПК-1.5, У-ПК-1.5, В-ПК-1.5, 3-ПК-1.6, У-ПК-1.6, В-ПК-1.6, 3-ПК-4, У-ПК-4, В-ПК-4, 3-ПК-9, У-ПК-9, В-ПК-9
2	Часть 2	9-15	3/11/0		25	T-15	3-ПК-1.5, У-ПК-1.5, В-ПК-1.5, 3-ПК-1.6, У-ПК-1.6,

							В-ПК-1.6, 3-ПК-4, У-ПК-4, В-ПК-4, 3-ПК-9, У-ПК-9, В-ПК-9
	<i>Итого за 2 Семестр</i>		7/23/0		50		
	<b>Контрольные мероприятия за 2 Семестр</b>				50	Э	3-ПК-1.5, У-ПК-1.5, В-ПК-1.5, 3-ПК-1.6, У-ПК-1.6, В-ПК-1.6, 3-ПК-4, У-ПК-4, В-ПК-4, 3-ПК-9, У-ПК-9, В-ПК-9

\* – сокращенное наименование формы контроля

\*\* – сумма максимальных баллов должна быть равна 100 за семестр, включая зачет и (или) экзамен

Сокращение наименований форм текущего контроля и аттестации разделов:

Обозначение	Полное наименование
Т	Тестирование
Э	Экзамен

## КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Недели	Темы занятий / Содержание	Лек., час.	Пр./сем., час.	Лаб., час.
	<i>2 Семестр</i>	7	23	0
<b>1-8</b>	<b>Часть 1</b>	4	12	0
1 - 3	<b>Введение.</b> Волоконная оптика. Волоконные световоды и устройства на их основе. Твердотельные лазеры. Вспомогательное излучение накачки в системах со многими уровнями энергии. Безизлучательная релаксация в твердом теле. Колебательный спектр матрицы. Примеры ионов неодима, иттербия, эрбия. Ион-ион взаимодействие. Выбор оптимальной концентрации. Рубиновый и неодимовый лазеры.	Всего аудиторных часов		
		1	5	0
		Онлайн		
		0	0	0
4 - 5	<b>Непрерывные волоконные лазеры средней мощности.</b> Элементы волоконного лазера. Активные добавки волоконных световодов. Активные волоконные световоды. Схемы накачки активных световодов. Особенности волоконных световодов как усилительной среды.	Всего аудиторных часов		
		1	3	0
		Онлайн		
		0	0	0



	Волоконные брэгговские решетки. Длиннопериодные волоконные решетки. Методы изготовления решеток показателя преломления. УФ источники для записи решеток. Применение волоконных брэгговских решеток.			
6	<b>Характеристики волоконных лазеров.</b> Лазеры на основе световодов, легированных ионами Nd <sup>3+</sup> , Yb <sup>3+</sup> , Er <sup>3+</sup> , Ho <sup>3+</sup> . Мощные волоконные лазеры. Конструкция и технические характеристики.	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		Онлайн		
		0	0	0
7 - 8	<b>Методы нелинейной оптики.</b> Генерация гармоник. Вынужденное комбинационное рассеяние. Волоконные лазеры видимого диапазона. Построение волоконных ВКР-лазеров. Однокаскадные ВКР-лазеры. Многокаскадные ВКР-лазеры. Составные ВКР-лазеры. Импульсные волоконные лазеры.	Всего аудиторных часов		
		1	3	0
		Онлайн		
		0	0	0
9-15	<b>Часть 2</b>	3	11	0
9	<b>Волоконные усилители.</b> Усилители оптических сигналов в ВОЛС. Оптические усилители, использующие нелинейные явления в оптических волокнах.	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		Онлайн		
		0	0	0
10	<b>Физические процессы при взаимодействии лазерного излучения с материалами.</b> Энергетические условия взаимодействия лазерного излучения при обработке материалов. Плазменные процессы при лазерной обработке. Тепловые процессы при лазерном воздействии.	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		Онлайн		
		0	0	0
11	<b>Элементы лазерных технологий.</b> Лазерная сварка. Лазерная резка и сверление материалов. Лазерное легирование материалов. Лазерная маркировка и гравировка.	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		Онлайн		
		0	0	0
12 - 15	<b>Применение волоконных лазеров.</b> Лазерное оборудование для обработки материалов. Волоконные лазеры для обработки материалов. Медицинские аппараты на основе волоконных лазеров. Фемтосекундный спектрометрический комплекс на основе волоконного лазера. Волоконно-оптические линии связи. Волоконные лазеры для ВОЛС. Волоконные лазеры для перспективных направлений лазерной обработки материалов.	Всего аудиторных часов		
		0	8	0
		Онлайн		
		0	0	0

Сокращенные наименования онлайн опций:

Обозначение	Полное наименование
ЭК	Электронный курс
ПМ	Полнотекстовый материал
ПЛ	Полнотекстовые лекции
ВМ	Видео-материалы
АМ	Аудио-материалы
Прз	Презентации
Т	Тесты
ЭСМ	Электронные справочные материалы
ИС	Интерактивный сайт

## 5. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

При освоении данной дисциплины основную роль играют аудиторские занятия в виде лекций (с визуализацией), а также самостоятельная работа студентов, заключающаяся в выполнении домашнего задания, повторения ранее пройденного материала.

## 6. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

Фонд оценочных средств по дисциплине обеспечивает проверку освоения планируемых результатов обучения (компетенций и их индикаторов) посредством мероприятий текущего, рубежного и промежуточного контроля по дисциплине.

Связь между формируемыми компетенциями и формами контроля их освоения представлена в следующей таблице:

Компетенция	Индикаторы освоения	Аттестационное мероприятие (КП 1)
ПК-1.5	З-ПК-1.5	Э, Т-8, Т-15
	У-ПК-1.5	Э, Т-8, Т-15
	В-ПК-1.5	Э, Т-8, Т-15
ПК-1.6	З-ПК-1.6	Э, Т-8, Т-15
	У-ПК-1.6	Э, Т-8, Т-15
	В-ПК-1.6	Э, Т-8, Т-15
ПК-4	З-ПК-4	Э, Т-8, Т-15
	У-ПК-4	Э, Т-8, Т-15
	В-ПК-4	Э, Т-8, Т-15
ПК-9	З-ПК-9	Э, Т-8, Т-15
	У-ПК-9	Э, Т-8, Т-15
	В-ПК-9	Э, Т-8, Т-15

## Шкалы оценки образовательных достижений

Шкала каждого контрольного мероприятия лежит в пределах от 0 до установленного максимального балла включительно. Итоговая аттестация по дисциплине оценивается по 100-балльной шкале и представляет собой сумму баллов, заработанных студентом при выполнении заданий в рамках текущего и промежуточного контроля.

Итоговая оценка выставляется в соответствии со следующей шкалой:

Сумма баллов	Оценка по 4-ех балльной шкале	Оценка ECTS	Требования к уровню освоению учебной дисциплины
90-100	5 – «отлично»	A	Оценка «отлично» выставляется студенту, если он глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, использует в ответе материал монографической литературы.

85-89	4 – «хорошо»	В	Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос.
75-84		С	
70-74		Д	
65-69	3 – «удовлетворительно»	Е	Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала.
60-64			
Ниже 60	2 – «неудовлетворительно»	Ф	Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки. Как правило, оценка «неудовлетворительно» ставится студентам, которые не могут продолжить обучение без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине.

## 7. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

### ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. ЭИ Б 73 Волоконные технологические лазеры и их применение : учебное пособие, Голубенко Ю. В., Богданов А. В., Санкт-Петербург: Лань, 2021
2. ЭИ К 44 Квантовая и оптическая электроника : учебное пособие, Киселев Г. Л., Санкт-Петербург: Лань, 2020
3. ЭИ Б 82 Лазеры: устройство и действие : учебное пособие, Ивакин С. В., Борейшо А. С., Санкт-Петербург: Лань, 2021
4. 537 3-43 Принципы лазеров : , Звелто О., Санкт-Петербург [и др.]: Лань, 2008

### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 621.7 Ш65 Лазерный синтез функционально-градиентных мезоструктур и объемных изделий : , Шишковский И.В., Москва: Физматлит, 2009
2. 535 Ш47 Принципы нелинейной оптики : , Шен И.Р., М.: Наука, 1989

### ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

Специальное программное обеспечение не требуется

### LMS И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ:

<https://online.mephi.ru/>

<http://library.mephi.ru/>

## **8. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

Специальное материально-техническое обеспечение не требуется

## **9. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ**

При изучении курса «Волоконные лазеры» необходимо твердо усвоить основные положения волоконной оптики, конструкции волоконных световодов и устройств на их основе, отличия волоконных лазеров от других типов лазеров, основные элементы волоконного лазера, активные добавки волоконных световодов. При анализе генерационных характеристик волоконных лазеров, использующих различные активные добавки нужно хорошо разбираться в различных схемах накачки активных световодов и особенностях волоконных световодов как усилительной среды.

При анализе элементов волоконного лазера особое внимание необходимо обратить на методы формирования волоконных брэгговских решеток, на их основные характеристики и способы их стабилизации, а также источники УФ-излучения, используемые при их изготовлении.

При изучении характеристик волоконных лазеров, использующих различные активные добавки, особое внимание следует обратить на лазеры на основе световодов, легированных ионами  $\text{Yb}^{3+}$  и  $\text{Er}^{3+}$ .

Рассматривая материалы, относящиеся к мощным волоконным лазерам, необходимо хорошо усвоить конструктивные особенности таких лазеров и их предельные характеристики.

При изучении темы волоконные ВКР-лазеры необходимо сначала ознакомиться с основными понятиями нелинейной оптики, изучить материалы, относящиеся к проблеме вынужденного комбинационного рассеяния и генерации гармоник.

В разделе применения волоконных лазеров очень важным является рассмотрение физических процессов взаимодействия лазерного излучения с материалами, плазменных и тепловых процессов при лазерном воздействии. В разделе волоконно-оптические линии связи особое внимание нужно обратить на варианты реализации таких систем и основные элементы систем связи.

Для выполнения самостоятельной работы получить у преподавателя задание и список рекомендованной литературы. Изучение теоретических вопросов следует проводить по возможности самостоятельно, но при затруднениях обращаться к преподавателю. Подготовить письменный отчет о проделанной работе. При выполнении фронтальных заданий по усмотрению преподавателя работа может быть оценена без письменного отчета на основе ответов на контрольные вопросы, при условии активной самостоятельной работы.

## **10. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ**

Лекционный курс строится по следующему плану: сначала вводятся и обсуждаются основные понятия волоконной оптики, рассматриваются конструктивные особенности волоконных световодов и принципы работы твердотельных лазеров различного типа. Потом рассматриваются элементы волоконных лазеров, их характеристики и методы их изготовления. Далее рассматриваются вопросы, связанные с созданием волоконных лазеров на основе световодов, легированных ионами неодима, иттербия, эрбия и гольмия. В занятиях по нелинейной оптике, рассматриваются основные положения нелинейной оптики и более подробно те эффекты, которые используются при создании волоконных лазеров.

Заключительные разделы курса посвящены ознакомлению с практическим применением волоконных лазеров: в лазерной технологии, медицине, в волоконно-оптических линиях связи, при проведении фундаментальных физических экспериментов.

С целью выработки профессиональных компетенций студентов на занятиях используется интерактивная форма (20%) проведения занятий. Активная форма проведения занятий предполагает, в частности, что студенты самостоятельно прорабатывают отдельные дополнительные разделы курса с учетом дополнительной литературы, сообщаемой преподавателем.

Автор(ы):

Петровский Виктор Николаевич, к.ф.-м.н., с.н.с.

Рецензент(ы):

Кузнецов А.П., д.ф.м.н., доцент