

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**  
**ЛАЗЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ И ОХЛАЖДЕНИЕ АТОМОВ**

Направление подготовки  
(специальность)

[1] 12.04.05 Лазерная техника и лазерные технологии

Семестр	Трудоемкость, кред.	Общий объем курса, час.	Лекции, час.	Практич. занятия, час.	Лаборат. работы, час.	В форме практической подготовки/ В	СРС, час.	KCP, час.	Форма(ы) контроля, экз./зач./КР/КП
2	2	72	15	15	0		42	0	3
3	3	108	16	16	0		40	0	Э
Итого	5	180	31	31	0	0	82	0	

## **АННОТАЦИЯ**

Курс состоит из двух семестров. Первый семестр посвящен современных проблемам квантовой электроники. Изучаются характеристики перестраиваемых лазеров, работающих в непрерывном одночастотном режиме. Анализируется фундаментальное ограничение спектрального разрешения таких лазеров, обусловленное влиянием спонтанного шума на фазовые флуктуации поля рабочей моды лазера. Для различных типов лазеров сопоставлены вклады названного фундаментального ограничения и технических частотных шумов. Описываются методы сужения линии генерации, селекции мод для обеспечения одночастотной генерации, перестройки и стабилизации частоты лазерного излучения. Также, изучаются следующие методы нелинейной внутридоплеровской спектроскопии: однофотонная спектроскопия насыщения; интерференционная, поляризационная, двухфотонная; спектроскопия ионных пучков. Анализируются различные механизмы формирования нелинейности. Обсуждаются ограничения спектрального разрешения в этих методах.

Второй семестр посвящен лазерной спектроскопии и охлаждению атомов. Первые три лекции посвящены спектроскопии высокого временного разрешения. В них изучаются методы генерации ультракоротких импульсов лазерного излучения и рассматривается ряд их применений. Остальные лекции представляют собой введение в физику лазерного охлаждения атомов, в которых анализируются методы управления внутренними и внешними степенями свободы атомов. Значительная часть материала содержит описание экспериментальных методов формирования вырожденных разреженных Бозе и Ферми газов. Заключительная лекция дает краткий обзор применения ультрахолодных атомов в метрологии частоты и времени.

Учебные задачи курса. Ознакомиться с принципом работы перестраиваемых лазеров и их основными характеристиками. Освоить физику формирования внутридоплеровских спектров. Понимать достоинства и недостатки различных методов спектроскопии свободной от доплеровского уширения. Освоить методы формирования и усиления ультракоротких импульсов лазерного излучения. Ознакомиться с их применением в исследованиях быстропротекающих процессов. Достичь понимания основных идей, обеспечивающих глубокое охлаждение атомов. Уметь оценить доплеровский предел температуры. Понимать экспериментальные методы формирования вырожденных газов и роль специфики механизмов рассеяния при низких температурах.

## **1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

Целью изучения дисциплины «Лазерная спектроскопия и охлаждение атомов» является формирование у магистрантов общего представления о путях развития квантовой радиофизики и отработки навыков необходимых для успешной научной и профессиональной деятельности в квантовой радиофизике и, в частности, лазерной спектроскопии высокого спектрального и временного разрешения и многих ее приложениях, таких, в частности, как физика плазмы, метрология, физика классических и вырожденных разреженных газов при ультразвуковых температурах

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

Дисциплина логически и содержательно-методически связана со следующими разделами физики: механикой классической и квантовой, электродинамикой, статистической физикой, оптикой, лазерной физикой. Освоение данной дисциплины необходимо для получения теоретической базы и знакомства с экспериментальными методами классических и наиболее актуальных направлений квантовой радиофизики, лазерной спектроскопии и ее приложений.

### **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			
формулирование задачи и плана научного исследования в области лазерной физики, техники и лазерных технологий на основе проведения библиографической работы с применением современных информационных технологий; построение математических моделей объектов исследования, выбор алгоритма решения задачи; теоретические и экспериментальные исследования в области физики лазеров, взаимодействия лазерного излучения с веществом, лазерных	процессы взаимодействия лазерного излучения с веществом, включая биологические объекты; лазерные приборы, системы и технологии различного назначения; процессы генерации, усиления, модуляции, распространения и детектирования лазерного излучения; элементная база лазерной техники, технологий и систем управления и транспорта лазерного	ПК-1.2 [1] - способен использовать знания основ теории резонансного взаимодействия излучения с веществом; теории квантовых усилителей и генераторов, методов создания и усиления коротких лазерных импульсов в своей практической деятельности;  Основание: Профессиональный стандарт: 29.004	З-ПК-1.2[1] - Знать: основы теории резонансного взаимодействия излучения с веществом; теории квантовых усилителей и генераторов, методы создания и усиления коротких лазерных импульсов ; У-ПК-1.2[1] - Уметь: описывать процессы, происходящие при усиливании и генерации лазерного излучения.; В-ПК-1.2[1] - Владеть: методами оценки параметров лазерного излучения

<p>технологий; разработка методов лазерной диагностики сред и объектов, лазерных медицинских технологий и технологий обработки материалов; оптических информационных технологий; разработка лазерных приборов и технологических систем различного назначения проведение оптических, фотометрических, электрических измерений с выбором технических средств и обработкой результатов; оформление отчетов, статей, рефератов на базе современных средств редактирования и печати в соответствии с установленными требованиями</p>	<p>излучения; математические модели объектов исследования; методы лазерно-физических измерений</p>		
<p>формулирование задачи и плана научного исследования в области лазерной физики, техники и лазерных технологий на основе проведения библиографической работы с применением современных информационных технологий; построение математических моделей объектов исследования, выбор алгоритма решения задачи; теоретические</p>	<p>процессы взаимодействия лазерного излучения с веществом, включая биологические объекты; лазерные приборы, системы и технологии различного назначения; процессы генерации, усиления, модуляции, распространения и детектирования лазерного</p>	<p>ПК-1.3 [1] - способен применять знания основ лазерной спектроскопии, в том числе высокого спектрального и временного разрешения; физических эффектов при распространении лазерного излучения в нелинейных и диспергирующих средах; физических основ взаимодействия лазерного излучения с металлами, диэлектриками и полупроводниками,</p>	<p>З-ПК-1.3[1] - Знать: основы лазерной спектроскопии, в том числе высокого спектрального и временного разрешения; физические эффекты при распространении лазерного излучения в нелинейных и диспергирующих средах; физические основы взаимодействия лазерного излучения с металлами, диэлектриками и полупроводниками,</p>

<p>и экспериментальные исследования в области физики лазеров, взаимодействия лазерного излучения с веществом, лазерных технологий; разработка методов лазерной диагностики сред и объектов, лазерных медицинских технологий и технологий обработки материалов; оптических информационных технологий; разработка лазерных приборов и технологических систем различного назначения</p> <p>проведение оптических, фотометрических, электрических измерений с выбором технических средств и обработкой результатов; оформление отчетов, статей, рефератов на базе современных средств редактирования и печати в соответствии с установленными требованиями</p>	<p>излучения; элементная база лазерной техники, технологий и систем управления и транспорта лазерного излучения; математические модели объектов исследования; методы лазерно-физических измерений</p>	<p>биологическими тканями; принципов и методов когерентно-оптических преобразований, хранения и обработки оптической информации при разработке лазерных систем и инновационных лазерных технологий</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 29.004</p>	<p>биологическими тканями; принципы и методы когерентно-оптических преобразований, хранения и обработки оптической информации ; У-ПК-1.3[1] - Уметь: применять знания основ лазерной спектроскопии, в том числе высокого спектрального и временного разрешения; физических эффектов при распространении лазерного излучения в нелинейных и диспергирующих средах; физических основ взаимодействия лазерного излучения с металлами, диэлектриками и полупроводниками, биологическими тканями; принципов и методов когерентно-оптических преобразований, хранения и обработки оптической информации при разработке лазерных систем и инновационных лазерных технологий ; В-ПК-1.3[1] - Владеть: навыками решения задач, связанных с разработкой лазерных систем и инновационных лазерных технологий</p>
<p>формулирование задачи и плана научного исследования в области лазерной физики, техники и</p>	<p>процессы взаимодействия лазерного излучения с веществом, включая</p>	<p>ПК-1.4 [1] - способен ставить экспериментальные задачи и проводить экспериментальные исследования в области</p>	<p>З-ПК-1.4[1] - Знать: основные методы экспериментальных исследований с применением лазеров, методы сбора и</p>

<p>лазерных технологий на основе проведения библиографической работы с применением современных информационных технологий; построение математических моделей объектов исследования, выбор алгоритма решения задачи; теоретические и экспериментальные исследования в области физики лазеров, взаимодействия лазерного излучения с веществом, лазерных технологий; разработка методов лазерной диагностики сред и объектов, лазерных медицинских технологий и технологий обработки материалов; оптических информационных технологий; разработка лазерных приборов и технологических систем различного назначения</p> <p>проведение оптических, фотометрических, электрических измерений с выбором технических средств и обработкой результатов; оформление отчетов, статей, рефератов на базе современных средств редактирования и печати в соответствии с установленными</p>	<p>биологические объекты; лазерные приборы, системы и технологии различного назначения; процессы генерации, усиления, модуляции, распространения и детектирования лазерного излучения; элементная база лазерной техники, технологий и систем управления и транспорта лазерного излучения; математические модели объектов исследования; методы лазерно-физических измерений</p>	<p>взаимодействия излучения с веществом, лазерной диагностики и лазерных технологий; применять современные средства измерений, средства управления экспериментом, сбора и обработки данных</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 29.004</p>	<p>обработки данных; У-ПК-1.4[1] - Уметь: ставить экспериментальные задачи и проводить экспериментальные исследования в области взаимодействия излучения с веществом, лазерной диагностики и лазерных технологий; применять современные средства измерений, средства управления экспериментом, сбора и обработки данных; В-ПК-1.4[1] - Владеть: навыками проведения экспериментальных исследований в области лазерной физики и лазерных технологий, применения современных средств измерений</p>
---	--	---	--

требованиями			
формулирование задачи и плана научного исследования в области лазерной физики, техники и лазерных технологий на основе проведения библиографической работы с применением современных информационных технологий; построение математических моделей объектов исследования, выбор алгоритма решения задачи; теоретические и экспериментальные исследования в области физики лазеров, взаимодействия лазерного излучения с веществом, лазерных технологий; разработка методов лазерной диагностики сред и объектов, лазерных медицинских технологий и технологий обработки материалов; оптических информационных технологий; разработка лазерных приборов и технологических систем различного назначения проведение оптических, фотометрических, электрических измерений с выбором технических средств и обработкой результатов;	процессы взаимодействия лазерного излучения с веществом, включая биологические объекты; лазерные приборы, системы и технологии различного назначения; процессы генерации, усиления, модуляции, распространения и детектирования лазерного излучения; элементная база лазерной техники, технологий и систем управления и транспорта лазерного излучения; математические модели объектов исследования; методы лазерно-физических измерений	ПК-2 [1] - способен разрабатывать математические модели объектов исследования и выбирать численный метод их моделирования (анализа), разрабатывать новый или выбирать готовый алгоритм решения задачи  <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 29.004	З-ПК-2[1] - Знать: численные методы анализа объектов исследования; стандартные языки программирования; стандартные и специальные пакеты математического моделирования; ; У-ПК-2[1] - Уметь: поставить задачу и определить набор параметров, с учётом которых должно быть проведено моделирование процессов, явлений лазерной техники и технологий; разрабатывать простые и средней сложности математические модели лазерных технологических процессов и модели функционирования лазерных приборов и систем; анализировать полученные результаты моделирования процессов, явлений на основе физических представлений ; В-ПК-2[1] - Владеть: навыками компьютерного моделирования процессов, явлений лазерной техники и технологий

оформление отчетов, статей, рефератов на базе современных средств редактирования и печати в соответствии с установленными требованиями				
--	--	--	--	--

#### 4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

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

№ п.п	Наименование раздела учебной дисциплины	Недели	Лекции/ Практ. (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	8/8/0		25	КИ-8	3-ПК-1.2, У-ПК-1.2, В-ПК-1.2, 3-ПК-1.3, У-ПК-1.3, В-ПК-1.3, 3-ПК-1.4, У-ПК-1.4, В-ПК-1.4, 3-ПК-2, У-ПК-2, В-ПК-2
2	Часть 2	9-15	7/7/0		25	КИ-15	3-ПК-1.2, У-ПК-1.2, В-ПК-1.2, 3-ПК-1.3, У-ПК-1.3, В-ПК-1.3, 3-ПК-1.4, У-ПК-1.4, В-ПК-1.4, 3-ПК-2, У-ПК-2, В-ПК-2
	<i>Итого за 2 Семестр</i>		15/15/0		50		
	<b>Контрольные мероприятия за 2 Семестр</b>				50	3	3-ПК-1.2, У-ПК-1.2, В-ПК-1.2, 3-ПК-1.3, У-ПК-1.3, В-ПК-1.3,

						З-ПК-1.4, У-ПК-1.4, В-ПК-1.4, З-ПК-2, У-ПК-2, В-ПК-2
	<i>3 Семестр</i>					
1	Часть 1	1-8	8/8/0		25	КИ-8 З-ПК-1.2, У-ПК-1.2, В-ПК-1.2, З-ПК-1.3, У-ПК-1.3, В-ПК-1.3, З-ПК-1.4, У-ПК-1.4, В-ПК-1.4, З-ПК-2, У-ПК-2, В-ПК-2
2	Часть 2	9-16	8/8/0		25	КИ-16 З-ПК-1.2, У-ПК-1.2, В-ПК-1.2, З-ПК-1.3, У-ПК-1.3, В-ПК-1.3, З-ПК-1.4, У-ПК-1.4, В-ПК-1.4, З-ПК-2, У-ПК-2, В-ПК-2
	<i>Итого за 3 Семестр</i>		16/16/0		50	
	<b>Контрольные мероприятия за 3 Семестр</b>				50	Э З-ПК-1.2, У-ПК-1.2, В-ПК-1.2, З-ПК-1.3, У-ПК-1.3, В-ПК-1.3, З-ПК-1.4, У-ПК-1.4, В-ПК-1.4, З-ПК-2, У-ПК-2, В-ПК-2

\* – 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
-------------	---------------------

КИ	Контроль по итогам
З	Зачет
Э	Экзамен

## КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Недели	Темы занятий / Содержание	Лек., час.	Пр./сем., час.	Лаб., час.
	<i>2 Семестр</i>	15	15	0
<b>1-8</b>	<b>Часть 1</b>	8	8	0
1	<b>I. Непрерывный режим генерации лазеров. Высокое спектральное разрешение.</b> Лазеры и новые возможности спектроскопии. Некоторые методы долазерной спектроскопии (атомные пучки, квантовые биения, эффект Ханле , оптическая накачка и двойной радио-оптический резонанс).	Всего аудиторных часов 1 Онлайн 0	1 0	0
2	<b>I. Непрерывный режим генерации лазеров. Высокое спектральное разрешение.</b> Интерферометр Фабри Перо. Добротность, резкость, резонансные частоты, ширина линии моды резонатора. Применения.	Всего аудиторных часов 1 Онлайн 0	1 0	0
3	<b>I. Непрерывный режим генерации лазеров. Высокое спектральное разрешение.</b> Ширина линии генерации одномодового газового Нелазера, работающего в непрерывном режиме в пренебрежении техническими шумами. Мощность спонтанного излучения в моду.	Всего аудиторных часов 1 Онлайн 0	1 0	0
4	<b>I. Непрерывный режим генерации лазеров. Высокое спектральное разрешение.</b> Перестраиваемые лазеры. Основные типы активных сред. Однородно- и неоднородно уширенная линии усиления.	Всего аудиторных часов 1 Онлайн 0	1 0	0
5	<b>I. Непрерывный режим генерации лазеров. Высокое спектральное разрешение.</b> Типы селективных элементов. Методы селекции мод резонатора по всем четырем индексам.Методы перестройки частоты генерации.	Всего аудиторных часов 1 Онлайн 0	1 0	0
6	<b>I. Непрерывный режим генерации лазеров. Высокое спектральное разрешение.</b> Многообразие структур полупроводниковых инжекционных лазеров. Роль волноводного эффекта. Оптические нелинейности активной среды и особенности спектральных и динамических характеристик диодных лазеров.	Всего аудиторных часов 1 Онлайн 0	1 0	0
7	<b>I. Непрерывный режим генерации лазеров. Высокое спектральное разрешение.</b> Межмодовый интервал, групповая скорость, плотность	Всего аудиторных часов 1 Онлайн	1 0	0

	энергии, добротность резонатора диодного лазера. Фактор Богатова-Генри.	0	0	0
8	<b>I. Непрерывный режим генерации лазеров. Высокое спектральное разрешение.</b> Ширина линии генерации диодных лазеров и методы ее уменьшения. Типы и характеристики диодных лазеров с внешним резонатором.	Всего аудиторных часов 1 Онлайн 0	1 0	0
<b>9-15</b>	<b>Часть 2</b>	7	7	0
9	<b>II. Внутридоплеровская спектроскопия .</b> Основы классификации атомных спектров. Характеристики резонансных линий атомов щелочных металлов. Механизмы уширения атомных линий. Эффект Дике. Оптические уравнения Блоха (начало)	Всего аудиторных часов 1 Онлайн 0	1 0	0
10	<b>II. Внутридоплеровская спектроскопия .</b> Внутридоплеровская спектроскопия. Механизмы насыщения в двухуровневой и многоуровневых атомных системах. Параметр насыщения. Частота Раби. Оптические уравнения Блоха (конец)	Всего аудиторных часов 1 Онлайн 0	1 0	0
11	<b>II. Внутридоплеровская спектроскопия .</b> Провал Лэмба. Внутридоплеровские резонансы. Перекрестные резонансы. Методы устранения доплеровского фона.	Всего аудиторных часов 1 Онлайн 0	1 0	0
12	<b>II. Внутридоплеровская спектроскопия .</b> Поляризационные методы внутридоплеровской спектроскопии. Интерференционные и гетеродинные методы.	Всего аудиторных часов 1 Онлайн 0	1 0	0
13	<b>II. Внутридоплеровская спектроскопия .</b> Двухфотонная спектроскопия.	Всего аудиторных часов 1 Онлайн 0	1 0	0
14	<b>II. Внутридоплеровская спектроскопия .</b> Подавление доплеровского уширения при ускорении ионных пучков. Селективное зеркальное отражение.	Всего аудиторных часов 1 Онлайн 0	1 0	0
15	<b>II. Внутридоплеровская спектроскопия .</b> Ограничения спектрального разрешения. Метод разнесенных полей в радиочастотной и оптической областях спектра. Расщепление линии из-за эффекта отдачи. Охлаждение и захват в ловушки атомов как метод подавления Доплеровского эффекта	Всего аудиторных часов 1 Онлайн 0	1 0	0
	<i>3 Семестр</i>	16	16	0
<b>1-8</b>	<b>Часть 1</b>	8	8	0
1	<b>Импульсный режим генерации лазеров. Высокое временное разрешение</b> Методы формирования коротких лазерных импульсов. Модуляция добротности.Методы синхронизации мод.	Всего аудиторных часов 1 Онлайн 0	1 0	0

2	<b>Импульсный режим генерации лазеров. Высокое временное разрешение</b> Методы генерации ультракоротких фемтосекундных импульсов.	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		Онлайн		
3	<b>Импульсный режим генерации лазеров. Высокое временное разрешение</b> Методы измерения длительности усиления коротких импульсов. Pump-probe метод.	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		Онлайн		
4	<b>Импульсный режим генерации лазеров. Высокое временное разрешение</b> Нестационарные интерференционные эффекты в лазерной спектроскопии. Фотонное эхо. Интерференция различных колебательных мод в молекулах.	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		Онлайн		
5	<b>Импульсный режим генерации лазеров. Высокое временное разрешение</b> Генератор гребенки частот и его метрологические применения. Спектральное и временное разрешение «в одном флаконе»	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		Онлайн		
6	<b>Импульсный режим генерации лазеров. Высокое временное разрешение</b> Торможение атомов в пучке. Обеспечение цикличности взаимодействия. Методы компенсации доплеровского сдвига	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		Онлайн		
7	<b>Лазерное охлаждение атомов</b> Охлаждение атомов во встречных пучках. Оптическая меласса. Доплеровский предел.	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		Онлайн		
8	<b>Лазерное охлаждение атомов</b> Магнито-оптическая ловушка. Магнитные ловушки.	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		Онлайн		
9-16	<b>Часть 2</b>	8	8	0
9	<b>Лазерное охлаждение атомов</b> Механизмы субдоплеровского охлаждения. Сизифово охлаждение.	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		Онлайн		
10	<b>Лазерное охлаждение атомов</b> Метод охлаждения, основанный на селективном по скоростям когерентном пленении населенностей. Испарительное охлаждение	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		Онлайн		
11	<b>Лазерное охлаждение атомов</b> Бозе конденсат в разреженных ансамблях атомов Rb и Na. Резонанс Фешбаха. Бозе конденсат атомов цезия. Получение вырожденного Ферми газа. Бозе конденсат молекул.	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		Онлайн		

12	<b>Лазерное охлаждение атомов</b> Эволюция стандартов частоты оптического и микроволнового диапазонов. Захват охлажденных атомов в ловушках – решетках. Магическая длина волны.	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		Онлайн		
13	<b>Лазерное охлаждение атомов</b> Резонанс Фешбаха.	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		Онлайн		
14	<b>Лазерное охлаждение атомов</b> Бозе конденсация атомов Цезия	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		Онлайн		
15 - 16	<b>Лазерное охлаждение атомов</b> Вырожденные Ферми газы.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		

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 аудиторные занятия и самостоятельная работа студентов, заключающаяся в изучении оригинальных статей по теме и представлении кратких докладов по изученным статьям. Важную роль играют и вопросы, задаваемые в процессе лекций. Поскольку данный курс читается на первом курсе магистратуры, целесообразно знать темы учебно-исследовательской работы (УИР) студентов и задавать им индивидуально вопросы по тем разделам лазерной спектроскопии, которые связаны с темой их УИР.

## 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:

<b>Компетенция</b>	<b>Индикаторы освоения</b>	<b>Аттестационное мероприятие (КП 1)</b>	<b>Аттестационное мероприятие (КП 2)</b>
ПК-1.2	З-ПК-1.2	З, КИ-8, КИ-15	Э, КИ-8, КИ-16
	У-ПК-1.2	З, КИ-8, КИ-15	Э, КИ-8, КИ-16
	В-ПК-1.2	З, КИ-8, КИ-15	Э, КИ-8, КИ-16
ПК-1.3	З-ПК-1.3	З, КИ-8, КИ-15	Э, КИ-8, КИ-16
	У-ПК-1.3	З, КИ-8, КИ-15	Э, КИ-8, КИ-16
	В-ПК-1.3	З, КИ-8, КИ-15	Э, КИ-8, КИ-16
ПК-1.4	З-ПК-1.4	З, КИ-8, КИ-15	Э, КИ-8, КИ-16
	У-ПК-1.4	З, КИ-8, КИ-15	Э, КИ-8, КИ-16
	В-ПК-1.4	З, КИ-8, КИ-15	Э, КИ-8, КИ-16
ПК-2	З-ПК-2	З, КИ-8, КИ-15	Э, КИ-8, КИ-16
	У-ПК-2	З, КИ-8, КИ-15	Э, КИ-8, КИ-16
	В-ПК-2	З, КИ-8, КИ-15	Э, КИ-8, КИ-16

### 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 иочно 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»	B	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		C	
70-74		D	
65-69	3 – «удовлетворительно»	E	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»	F	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 К 44 Квантовая и оптическая электроника : , Киселев Г. Л., Санкт-Петербург: Лань, 2022
2. 535 Д31 Лазерная спектроскопия : основные принципы и техника эксперимента, Демтрёдер В., Москва: Наука, 1985
3. ЭИ Б 82 Лазеры: применения и приложения : , Ивакин С. В. [и др.], Санкт-Петербург: Лань, 2022
4. ЭИ Л 22 Оптика : учебное пособие, Ландсберг Г. С., Москва: Физматлит, 2021
5. ЭИ Ф 90 Оптические спектры атомов : , Фриш С. Э., Санкт-Петербург: Лань, 2022
6. ЭИ К 85 Фемтосекундные импульсы. Введение в новую область лазерной физики : , Крюков П. Г., Москва: Физматлит, 2008

### **ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:**

1. 535 С42 Квантовая оптика : , Скалли М.О., Зубайри М.С., М.: Физматлит, 2003
2. 539.1 Л17 Лазерная спектроскопия атомов и молекул : , , М.: Мир, 1979
3. 621.37 К85 Лазеры ультракоротких импульсов и их применения : учебное пособие, Крюков П.Г., Долгопрудный: Интеллект, 2012
4. 535 Н49 Нелинейная спектроскопия : , , М.: Мир, 1979
5. 535 Д31 Современная лазерная спектроскопия : учебное пособие, Демтрёдер В., Долгопрудный: Интеллект, 2014
6. 621.37 К85 Фемтосекундные импульсы : введение в новую область лазерной физики, Крюков П.Г., Москва: Физматлит, 2008

### **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**

Для успешного освоения курса необходимо повторить такие разделы физики: теория высокодобротных колебательных систем, классический осциллятор, взаимосвязь действительной и мнимой частей показателя преломления, основы лазерной физики и атомной спектроскопии. Среди типов лазеров особенно важно знакомство с методами формирования инверсии и пространственной организации активной среды лазеров на красителях, центрах окраски, титан-сапфире и александrite, волоконных и полупроводниковых лазеров. В атомной спектроскопии необходимо понимание спектров атомов щелочных и щелочноземельных металлов. Среди задач квантовой механики важна задача о взаимодействии двухуровневого атома с резонансным электромагнитным полем.

Критичными для усвоения курса являются следующие вопросы:

- Теория спектральной ширины линии генерации одномодовых лазеров.
- Влияние насыщения усиления на динамические характеристики одномодовых лазеров.

Предельный цикл.

- Особенности динамических и спектральных свойств полупроводниковых лазеров.
- Методы перестройки частоты лазеров.
- Формирование провала Беннета.
- Формирование внутридоплеровского резонанса в двухуровневом атоме.
- Механизмы, приводящие к уширению внутридоплеровского резонанса.
- Формирование внутридоплеровского резонанса в трехуровневом атоме. Перекрестный резонанс.
- Три типа механизмов насыщения в атомах щелочных металлов
- Поляризационная спектроскопия
- Двухфотонная спектроскопия

В части курса, посвященной спектроскопии высокого временного разрешения, следует особое внимание уделить методам синхронизации мод, сопоставлению оптических нелинейностей, включая Керровскую, поддерживающих генерацию ультракоротких импульсов, и процессам ограничивающим минимальную длительность импульсов лазерного излучения. Важно освоить ряд примеров применения коротких импульсов в методе «накачка-зондирование» (“ринг-пробе”). Для лучшего усвоения этих примеров имеет смысл повторить основу систематики молекулярных спектров.

Если представление о дискретности энергетических уровней квантовых систем с финитным движением обычно надежно усвоено студентами к последнему семестру, то с практическими примерами проявления принципа суперпозиции квантовых состояний дело, как правило, обстоит хуже. Полезно проследить в курсе эффекты, обусловленные интерференцией: внутренних состояний атомов и молекул (квантовые биения); различных типов колебаний в

молекулах (волновые пакеты), атомов в атомных интерферометрах; ансамблей атомов, являющихся ломтиками одного бозе-конденсата.

Лекции по лазерному охлаждению атомов с одной стороны дают возможность повторить такие разделы физики как классическая механика (даже на школьном уровне), статистическая физика, квантовая механика, с другой - знакомят с современными методами активной лазерной спектроскопии, которая позволяет управлять внутренними и внешними степенями свободы атомных ансамблей.

Для успешного освоения курса особенно важно понимать: методы обеспечения цикличности взаимодействия атомов с лазерным излучением; механизм диффузии атомов в пространстве импульсов из-за спонтанного излучения; принцип работы ловушек охлажденных атомов (вязкой, магнито-оптической, чисто магнитной, чисто оптической) эффекты оптической накачки и светового сдвига уровней в переменном поле лазерного излучения (динамический Штарк эффект); роль упругих и неупругих столкновений в процессе испарительного охлаждения; специфику резонансного рассеяния атомов при ультранизких температурах. Успешная сдача экзамена предполагает знание условий возникновения вырожденных газов, наиболее серьезных препятствий на пути их создания и экспериментальных методов преодоления этих препятствий и формирования Бозе и Ферми газов. По материалам последней лекции необходимо достичь понимания последних направлений развития метрологии частоты и времени.

## 10. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ

В первой части первой половины курса напоминается о роли спектроскопии в науке (опыт Майкельсона → СТО; спектр излучения черного тела →  $\hbar$ : линейные атомные спектры → квантовая механика; Лэмбовский сдвиг → квантовая электродинамика; красное смещение → постоянная Хаббла, космология; метрология → секунда, метр; спектроскопия неравновесных состояний → лазеры).

Во второй – обсуждается роль лазеров в спектроскопии: узость линии → высокое спектральное разрешение; огромная спектральная плотность → нелинейная спектроскопия; сочетание монохроматичности и высокой интенсивности → внутридоплеровская спектроскопия; синхронизация мод → ультракороткие импульсы (УКИ) → сверхвысокое временное разрешение → метрология частоты и времени; пространственная когерентность → фокусировка → гигантские поля → физика плазмы, лазерный термояд; малая расходимость → зондирование атмосферы; управление внутренними степенями свободы квантовых систем → оптическая накачка, стандарты частоты, магнитометры; управление внешними степенями свободы атомов → охлаждение, захват атомов в ловушки, синтез вырожденных газов (Бозе и Ферми); стандарт частоты на ядерном переходе («ториевый проект»)

Половина лекций курса описывает основные характеристики лазеров важные для спектроскопии высокого разрешения. Вторая половина представляет основные методы внутридоплеровской спектроскопии.

Курс начинается с напоминания взаимосвязи параметров высокодобротных систем. Далее следует вывод предельной ширины линии генерации одночастотного лазера, работающего в непрерывном устойчивом режиме. Здесь особое внимание следует уделить поведению лазерного поля на фазовой плоскости в системе координат, вращающейся на оптической частоте. Следует дать вывод существования предельного цикла и отметить

существование отрицательной обратной связи для амплитуды поля и отсутствии ее для фазы. При описании шумовых характеристик лазеров важно подробно остановиться на особенностях шумов диодного лазера – доминировании в них квантовых флюктуаций. На фазовой плоскости удобно дать качественное объяснение фактора Генри-Богатова, ответственного за дополнительное уширение линии генерации диодных лазеров. При описании методов сужения линии ДЛ следует указать, что внешняя обратная связь, подавляя фазовые флюктуации, обусловленные спонтанным шумом в моде, делают доминирующим технический шум, нивелируя отличие диодных лазеров от всех прочих. Методы селекции мод и требование к согласованному изменению их частот и рабочей моды являются важной заключительной частью этой части лекций.

В лекциях по внутридиодлеровской спектроскопии особенно важно убедиться, что студенты не путают существование Бенеттского провала (одна бегущая волна) с наблюдаемым внутридиодлеровским резонансом в геометрии встречных волн и добиться понимания механизмов образования собственных и перекрестных резонансов. Следует обсудить способы наблюдения резонансов без диодлеровского фона. Перед лекцией о поляризационной спектроскопии имеет смысл напомнить на примере классического осциллятора о связи действительной и мнимой частей восприимчивости (поглощения и показателя преломления). При изложении материала по двухфотонной спектроскопии важно провести ее сопоставление с однофотонной.

Первые пять занятий второго семестра посвящены лазерной спектроскопии высокого временного разрешения.. Отчасти это оправдано тем, что в курсе «Теоретическая квантовая электроника», наоборот больше внимания уделяется ультракоротким импульсам. В этих занятиях кратко рассмотрены способы формирования и усиления коротких импульсов и некоторые их применения. В сжатой форме дается напоминание классификации молекулярных термов. Особое внимание уделяется сопоставлению уравнений Блоха для магнитного резонанса и оптических уравнений Блоха, обсуждаются квантовые биения, волновые пакеты, фотонное эхо, метрологическое применение гребенки частот.

Далее следуют занятия по лазерному охлаждению атомов. Эта тема охватывает и дает возможность повторить многие разделы физики. Имеет смысл напомнить, что низкая энергия атомов в ансамбле еще не означает, что ему можно приписать определенную температуру. Важно обеспечить понимание условий цикличности взаимодействия охлаждаемых атомов с лазерным излучением. Полезно детально сопоставить зеемановский способ замедления атомов в пучках и способ, основанный на подстройке частоты лазера. Важно обратить внимание на то, что в таких процессах замедления продольной скорости атомов в пучке происходит одновременное увеличение энергии в поперечных степенях свободы. Желательно детально обсудить механизмы: работы вязкой ловушки (баланс скорости диодлеровского охлаждения и разогрева за счет диффузии в пространстве импульсов) и образования консервативной силы в магнито-оптической ловушке. Здесь следует подчеркнуть роль сохранения проекции магнитного момента атома на направление магнитного поля при движении атома в неоднородном магнитном поле ловушки. Перед изложением субдиодлеровского (Сизифова) охлаждения необходимо подробно остановиться на световых сдвигах. Кроме Сизифова охлаждения описать целый ряд применений эффекта Штарка в переменном поле (он же и световой сдвиг). Обсудить роль задержки оптической накачки и градиента поляризации в Сизифовом охлаждении.

Знакомство со способами создания вырожденных разреженных газов следует начать с условий их возникновения, особенностей столкновительных процессов при низких

температурах. Желательно подробно обсудить первые эксперименты по созданию Бозе кондесатов в рубидии и натрии. Отметить проблему нарушения адиабатичности в центре магнитной ловушки. Важно объяснить, почему интерес исследователей последовательно переключался от магнитооптических ловушек к чисто магнитным, а затем – к чисто оптическим. Дать понятие о резонансе Фешбаха, обсудить способ управления длиной рассеяния магнитным полем. Кратко обсудить направление работ последнего десятилетия (вырожденные Ферми газы, Бозе-конденсация молекулярного газа).

На последнем занятии можно рассказать о применениях глубоко охлажденных атомов: о стандарте частоты СВЧ диапазона на атомном фонтане; о стандарте частоты оптического диапазона захваченных в решетке стоячей магической длины волны; о перспективах нового определения секунды; о возможности создания стандарта частоты на ядерном переходе в тории.

Автор(ы):

Величанский Владимир Леонидович, к.ф.-м.н.

Рецензент(ы):

д.ф.м.н., профессор Проценко Е.Д.