

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

**УТВЕРЖДЕНО**

**и.о. директора физтех-школы  
физики и исследований им.  
Ландау**

**А.А. Воронов**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Лазерная спектроскопия
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра лазерных систем и структурированных материалов
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 75 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 45 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 75 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 180, всего зач. ед.: 4

Программу составил: Д.Н. Козлов, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры лазерных систем и структурированных материалов 04.06.2020

## Аннотация

Цель курса - освоение студентами фундаментальных знаний в области лазерной спектроскопии, получения практических навыков решения задач, овладение методами их решения, а также понимание способов их практического применения. Форма линий поглощения при однородном и неоднородном уширениях. Дырки и пики Беннета. Насыщение при доплеровском уширении. Явление возникновения провала Лэмба. Спектроскопия внутри доплеровского контура, основанная на эффекте насыщения. Спектроскопия двухфотонного поглощения свободная от доплеровского уширения. Экспериментальная реализация спектроскопии насыщения поглощения атомов водорода и дейтерия. Экспериментальная реализация одновременной регистрации спектров насыщения и двухфотонного поглощения атомов водорода и дейтерия. Эксперименты с непрерывными лазерами. Проблемы, возникающие на пути повышения точности при переходе к непрерывным лазерам, и пути их преодоления. Проблема измерения частоты оптического излучения. Техника создания частотной гребенки (комб-генераторов) на основе непрерывной последовательности сверхкоротких импульсов. Синтезатор оптических частот. Достижения и применения прецизионной спектроскопии в фундаментальной физике. Часы на атомных фонтанах. Лазерное охлаждение и пленение атомов. Доплеровское охлаждение. Оптическая паточка. Субдоплеровское охлаждение («сизифово охлаждение»). Магнитооптическая ловушка. КАРС спектроскопия. Суть явления, особенности и экспериментальная реализация. Спектрометр одновременной регистрации ИК и КАРС спектров. Сравнение методов СКР, ВКР-усиления и КАРС. Двухфотонное поглощение и возможность исследования двухфотонных переходов в электронные состояния с помощью процесса четырехволнового смешения. Сравнение этих методов. Фононы и фононные поляритоны и их проявление в спектрах КРС. Спектроскопия КРС на фононных поляритонах.  $\pi$ - и  $\kappa$ -спектроскопия. Методика регистрации. Информация, доступная спектроскопии КРС на поляритонах. Экситоны и экситонные поляритоны. Методика экспериментального исследования дисперсии экситонных поляритонов. Нелинейно-оптические эффекты в средах с квадратичной нелинейностью. Источник терагерцового излучения, основанный на процессе генерации разностных частот. Нестационарная спектроскопия. Прямое измерение времени дефазировки и времени релаксации населенностей колебательных уровней. Сравнение (достоинства и недостатки) рассмотренных методов СКР-, ВКР-усиления, КАРС- и нестационарной спектроскопии.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

освоение студентами фундаментальных знаний в области лазерной спектроскопии, получения практических навыков решения задач, овладение методами их решения, а также понимание способов их практического применения.

### Задачи дисциплины

- формирование базовых знаний в области лазерной спектроскопии как дисциплины, интегрирующей общефизическую и общетеоретическую подготовку физиков и обеспечивающей технологические основы современных инновационных сфер деятельности;
- обучение студентов основным принципам решения задач в области лазерной спектроскопии и освоение основных теоретических методов, применимых в этой области физики;
- формирование правильных теоретических подходов к выполнению исследований студентами в области лазерной спектроскопии в рамках выпускных работ на степень магистра.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности

профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
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-1.2 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
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)
	ПК-3.2 Способен проводить эксперимент (моделирование) с использованием исследовательского оборудования (пакетов прикладных программ)
	ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов

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

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- место и роль общих вопросов науки в научных исследованиях;
- современные проблемы физики и математики;
- теоретические модели фундаментальных процессов и явлений в физике и ее приложениях;
- принципы симметрии и законы сохранения;
- новейшие открытия естествознания;
- постановку проблем моделирования физических процессов, протекающих в твердых телах;
- о взаимосвязях и фундаментальном единстве естественных наук.

уметь:

- эффективно использовать на практике теоретические компоненты науки: понятия, суждения, умозаключения, законы;
- представить панораму универсальных методов и законов современного естествознания;
- работать на современном экспериментальном оборудовании;
- абстрагироваться от несущественных влияний при моделировании реальных физических ситуаций;
- планировать оптимальное проведение эксперимента.

владеть:

- планированием, постановкой и обработкой результатов физического эксперимента;
- научной картиной мира;
- навыками самостоятельной работы в лаборатории на современном экспериментальном оборудовании;
- математическим моделированием физических задач.

### 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	Нелинейно-оптические явления и распро-странение волн в нелинейной среде.	6	9		15
2	Методы когерентной спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) света и их применения в исследовании структуры и динамики молекул.	10	15		20
3	Нелинейно-оптическая спектроскопия поляритонов.	8	12		20
4	Нестационарная спектроскопия.	6	9		20
Итого часов		30	45		75
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		180 час., 4 зач.ед.			

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

Семестр: 2 (Весенний)

##### 1. Нелинейно-оптические явления и распро-странение волн в нелинейной среде.

###### Лекции 1-2

Нелинейная поляризация и характерные нелинейно-оптических явления. Связанные волны в нелинейной среде в приближении медленно меняющихся амплитуд.

###### Лекции 3-4

Взаимодействие двух электромагнитных волн в условиях близости суммы или разности их частот к частоте собственного возбуждения среды. ВКР-усиление и ослабление, спонтанное КР и двухфотонное поглощение в centrosymmetric средах. Система уравнений для связанных волн в средах без центра симметрии (с участием поляритонов).

##### 2. Методы когерентной спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) света и их применения в исследовании структуры и динамики молекул.

###### Лекция 5

Описание процесса когерентного антистоксова комбинационного рассеяния света (КАРС) в centrosymmetric среде. Эффективность рассеяния, условия синхронизма, форма линии, связь  $\chi^{(3)}$  с сечением КР.

###### Лекции 6-7

Основные особенности, достоинства и недостатки КАРС спектроскопии. Сравнение методов спектроскопии спонтанного КР, ВКР-усиления и КАРС. Четырехволновое смешение при двухфотонном резонансе. Экспериментальная техника нелинейной когерентной спектроскопии. Спектральное, временное и пространственное разрешение. ИК-КАРС спектрометр.

###### Лекции 8-9

Механизмы и особенности уширения спектральных линий в спектрах КР и их изучение методом КАРС и ВКР-усиления. Исследования столкновительных процессов распределения и релаксации вращательной и колебательной энергии молекул методами когерентной спектроскопии рассеяния.

###### Лекция 10

Некоторые применения методов нелинейной спектроскопии КР в практических задачах по локальной невозмущающей диагностике газовых параметров: Измерение температуры и спектроскопия возбужденных разрядом колебательно-вращательных состояний азота. Исследование горения смесей  $\text{CH}_4/\text{O}_2$  и  $\text{O}_2/\text{H}_2$ .

### 3. Нелинейно-оптическая спектроскопия поляритонов.

#### Лекция 11

Описание процессов КР света на фононных поляритонах и двухфотонного поглощения света экситонными поляритонами на языке связанных волн в кристаллах без центра симметрии. ВКР-усиление, Эффективность спонтанного КР, коэффициент двухфотонного поглощения. Форма линии.  $k$ - и  $\omega$ (омега)-спектроскопия экситонных и фононных поляритонов.

#### Лекции 12-13

Частотно-угловые спектры рассеяния и двухфотонного поглощения. Нелинейно-оптическое возбуждение фононных поляритонов - источник для терагерцовой (ТГц) спектроскопии. Некоторые особенности ТГц-спектроскопии. Гиперкомбинационное рассеяние света на фононных и экситонных поляритонах.

### 4. Нестационарная спектроскопия.

#### Лекции 14-15

Время дефазировки и время релаксации населенностей. Принципы когерентной и некогерентной нестационарной активной спектроскопии и прямое измерение времени дефазировки и времени релаксации населенностей колебательных уровней.

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

Необходимое оборудование для лекций и практических занятий: учебная аудитория, оснащенная компьютером и мультимедийным оборудованием (проектор, звуковая система).

Необходимое программное обеспечение: офисный пакет OpenOffice для рефератов и презентаций, программа Origin (при наличии технической возможности).

Обеспечение самостоятельной работы – доступ в Интернет, базы данных по журналам American Physical Society, American Institute of Physics, Institute of Physics, Nature, Springer Verlag, библиотека ИОФ РАН.

## 6. Перечень рекомендуемой литературы

### Основная литература

1. Принципы нелинейной оптики [Текст]/И. Р. Шен, -М., Наука, 1989
2. Современная лазерная спектроскопия [Текст] : [учеб. пособие для вузов] / В. Демтрёдер ; пер. с англ. М. В. Рябининой [и др.] ; под ред. Л. А. Мельникова .— [4-е изд., перераб.] .— Долгопрудный : Интеллект, 2014 .— 1072 с.
3. Принципы нелинейной лазерной спектроскопии [Текст]/В. С. Летохов, В. П. Чеботаев, -М., Наука, 1975
4. Нелинейная лазерная спектроскопия сверхвысокого разрешения [Текст]/В. С. Летохов, В. П. Чеботаев, -М., Наука, 1990

5. Нелинейная спектроскопия. Под ред. Н.Бломбергера. М.: Мир. 1979.
6. С.А.Ахманов, Н.И.Коротеев. Методы нелинейной оптики в спектроскопии рассеяния света. М.: Наука. 1981.
7. Дж.Ниблер, Г.Найтен. Спектроскопия когерентного антистоксова рассеяния света. В сб. Спектроскопия комбинационного рассеяния света в газах и жидкостях. Под ред. А.Вебера. М.: Мир, 1982.
8. В.В.Смирнов. Лазерная спектроскопия когерентного антистоксова рассеяния света молекул-газов. Докт. диссерт., Москва, ИОФАН СССР, 1984г.
9. Лазерная спектроскопия комбинационного рассеяния в кристаллах и газах. Труды ИОФАН, т.2, 1986г.
10. Ю.Н.Поливанов. Комбинационное рассеяние света на поляритонах. УФН, 1978г., т.126, вып.2. с.185.
11. Ю.Н.Поливанов. Нелинейно-оптическое рассеяние света с участием фононных поляритонов. Труды ИОФАН, т.43, с.3, 1993.
12. Сверхкороткие световые импульсы. Под редакцией С.Шапиро. М.: Мир, 1981.
13. Е.В.Бакланов. Прецизионная лазерная спектроскопия атомов водорода и гелия. "Квантовая электроника", т.34, № 8, с.698 (2004).
14. Е.В.Бакланов, П.В.Покасов. Оптические стандарты частоты и фемтосекундные лазеры. "Квантовая электроника", т.33, № 5, с.383 (2003).
15. Развитие методов охлаждения и пленения атомов с помощью лазерного света. Нобелевские лекции по физике -1997г. УФН, т.169, № 3, с.271 (1999).
16. Н.Н.Колачевский. Лабораторные методы поиска дрейфа постоянной тонкой структуры. УФН, т.174, № 11, 1171 (2004).

#### Дополнительная литература

1. Введение в теорию атомных спектров [Текст] : [учеб. пособие для вузов] / И. И. Собельман .— М. : Наука, 1977 .— 320 с.
2. Квантовая механика атомов с одним и двумя электронами [Текст] / Г. Бете, Э. Солпитер ; пер. с англ. А. К. Бурцева ; под ред. Я. А. Смородинского .— М. : Физматлит, 1960 .— 562 с.
3. Основы молекулярной спектроскопии [Текст]/К. Бенуэлл , -М., Мир, 1985
4. Г.Герцберг. Колебательные и вращательные спектры молекул. М.: Физматгиз. 1949.
5. Е.Вильсон, Дж. Детнус, П. Кросс. Теория колебательных спектров молекул. М.: ИЛ, 1960.
6. У.Флайгер. Строение и динамика молекул. М.: Мир, 1982.
7. Ч.Киттель. Введение в физику твердого тела. М.: Наука. 1978.
8. М.Борн, К.Хуан. Динамическая теория кристаллических решеток.
9. Питер Ю., Мануэль Кардона. Основы физики полупроводников. М., Физматлит, 2002г.
10. М.Херман. Полупроводниковые сверхрешетки. М.: Мир. 1989.
11. Экситоны Под ред. Э.И.Рашба, М.Д.Стерджа. М. Наука, 1985
12. Поверхностные поляритоны. Под ред. В.М.Аграновича, Д.Л.Миллса. М. Наука, 1985

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

Информационные ресурсы: Журналы по физике твердого тела (Физика твердого тела, Кристалло-графия, ЖТФ, Письма в ЖТФ, Physica Status Solidi b, Physical Review B и др.), доступные через Internet научные и научно-технические журналы: <http://scitation.aip.org/>, <http://www.sciencemag.org/> электронные конспекты лекций, учебные пособия и сборники задач, разработанные для данного курса.

#### **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. В процессе самостоятельной работы обучающихся возможно использование таких программных средств, как OpenOffice.

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

Студент, изучающий курс «Лазерная спектроскопия», должен иметь базовую подготовку в области физики лазеров, например, в объеме курса «Основы лазерной физики». Поскольку в ходе лекций для иллюстрации общих принципов проводится обсуждение современных актуальных проблем лазерной спектроскопии, которые не в полной мере отражены в существующих учебниках, посещение лекций является абсолютно необходимым для успешного усвоения изучаемого материала.

Успешное освоение курса требует напряжённой самостоятельной работы студента. Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение и конспектирование рекомендованной литературы,
- проработку учебного материала (по конспектам лекций, учебной и научной литературе), подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения, доказательство отдельных утверждений, свойств;
- решение задач, предлагаемых студентам на лекциях и практических занятиях,
- подготовку к практическим занятиям, экзамену.

Руководство и контроль за самостоятельной работой студента осуществляется в форме индивидуальных консультаций. С целью углубленного изучения тех или иных разделов курса студентам могут быть предложены специальные темы для самостоятельной работы.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра лазерных систем и структурированных материалов
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен

**Разработчик:** Д.Н. Козлов, канд. физ.-мат. наук



## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
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-1.2 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
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)
	ПК-3.2 Способен проводить эксперимент (моделирование) с использованием исследовательского оборудования (пакетов прикладных программ)
	ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Лазерная спектроскопия» обучающийся должен:

### знать:

- место и роль общих вопросов науки в научных исследованиях;
- современные проблемы физики и математики;
- теоретические модели фундаментальных процессов и явлений в физике и ее приложениях;
- принципы симметрии и законы сохранения;
- новейшие открытия естествознания;
- постановку проблем моделирования физических процессов, протекающих в твердых телах;
- о взаимосвязях и фундаментальном единстве естественных наук.

### уметь:

- эффективно использовать на практике теоретические компоненты науки: понятия, суждения, умозаключения, законы;
- представить панораму универсальных методов и законов современного естествознания;
- работать на современном экспериментальном оборудовании;
- абстрагироваться от несущественных влияний при моделировании реальных физических ситуаций;
- планировать оптимальное проведение эксперимента.

**владеть:**

- планированием, постановкой и обработкой результатов физического эксперимента;
- научной картиной мира;
- навыками самостоятельной работы в лаборатории на современном экспериментальном оборудовании;
- математическим моделированием физических задач.

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

Задания для самостоятельной работы, предполагается оформление реферата по одной из предложенных тем:

#### **Задание 1**

Темы задания:

1. Спектроскопия высокого разрешения (свободная от доплеровского уширения) атомов водорода и дейтерия и использование ее методов для решения фундаментальных проблем современной физики.
2. КАРС спектроскопия.

#### **Задание 2**

Темы задания:

1. Зонная структура электронных спектров в кристаллах. Одноэлектронное уравнение Шредингера в зонной теории. Образование энергетических зон. Теорема Блоха. Понятие эффективной массы. Экситоны и схема их энергетических уровней. Спектр поглощения вблизи края запрещенной зоны в полупроводниках.
2. Спектроскопия двухфотонного поглощения в средах с центром и без центра симметрии.

#### **Задание 3**

Темы задания:

1. Экспериментальная реализация и достижения в спектроскопии высокого разрешения (свободной от доплеровского уширения) атомов водорода и дейтерия. Дальнейшие перспективы.
2. Спектроскопия СКР и ВКР-усиления (ослабления) в средах с центром и без центра симметрии.

#### **Задание 4\***

Тема задания:

Экспериментальная техника нелинейной когерентной спектроскопии. Спектральное, временное и пространственное разрешение. Методы улучшения этих характеристик.

#### **Задание 5\***

Тема задания:

Применение методов нелинейной спектроскопии КР в практических задачах по локальной невозмущающей диагностике газовых параметров.

Задания, отмеченные звездочкой «\*» могут выбираться студентами по желанию.

Всего заданий в весеннем семестре три.

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

Промежуточная аттестация по дисциплине «Лазерная спектроскопия» осуществляется в форме экзамена. Экзамен проводится в устной форме.

Перечень контрольных вопросов для сдачи экзамена :

1. Описание процессов ВКР-усиления и спонтанного КР. Суть явлений, особенности и экспериментальная реализация. Сравнение методов СКР, ВКР-усиления и КАРС.
2. КАРС спектроскопия. Суть явления, особенности и экспериментальная реализация. Спектрометр одновременной регистрации ИК и КАРС спектров. Сравнение методов СКР, ВКР-усиления и КАРС.
3. Колебательные и вращательные уровни молекул и некоторые применения методов КАРС в практических задачах по локальной невозмущающей диагностике газовых параметров.
4. Двухфотонное поглощение и возможность исследования двухфотонных переходов в электронные состояния с помощью процесса четырехволнового смешения. Сравнение этих методов.
5. Фононы и фононные поляритоны и их проявление в спектрах КРС.
6. Спектроскопия КРС на фононных поляритонах.  $\omega(\omega)$ - и  $k$ -спектроскопия. Методика регистрации. Информация, доступная спектроскопии КРС на поляритонах.
7. Экситоны и экситонные поляритоны. Методика экспериментального исследования дисперсии экситонных поляритонов.
8. Нелинейно-оптические эффекты в средах с квадратичной нелинейностью. Источник терагерцового излучения, основанный на процессе генерации разностных частот.
9. Нестационарная спектроскопия. Прямое измерение времени дефазировки и времени релаксации населенностей колебательных уровней. Какие особенности появляются при «переходе» от возбуждения импульсами с длительностью пс масштаба к фс?
10. Сравнение (достоинства и недостатки) рассмотренных методов СКР-, ВКР-усиления, КАРС- и нестационарной спектроскопии. Привести конкретные примеры проблем, которые могут быть наиболее успешно решены при использовании какого-либо из перечисленных методов спектроскопии. Например, какой метод является наи-более подходящим (и почему) при исследовании загрязнения атмосферы или для измерения пространственного распределения температуры в камере сгорания  $H_2/O_2$  ит.д.

Экзаменационные билеты по курсу «Лазерная спектроскопия» для сдачи экзамена:

Билет №1.

1. Насыщение поглощения на доплеровски уширенном переходе..
2. Эффект образования провала Лэмба и обращенного провала Лэмба.
3. Использование лэмбовских провалов для стабилизации частоты газового лазера.

Билет №2

1. Спектры кристаллов. Зонная структура электронных спектров в кристаллах. Экситоны и схема их энергетических уровней.
2. Проблема измерения частоты оптического излучения.
3. Допплеровское охлаждение. Оптическая патока.

Билет №3

1. Изотопический сдвиг. Тонкая и сверхтонкая структура, лэмбовский сдвиг в атоме водорода и дейтерия.
2. Спектральная ширина линии излучения. Преобразование Фурье. Поглощение и дисперсия.
3. Субдоплеровское охлаждение («сизифово охлаждение»).

Билет №4

1. Проявление неидеальности молекул в колебательно-вращательных спектрах (ангармонизм, центробежное ускорение). Спектры двухатомных молекул.
2. Особенности спектров полупроводниковых структур пониженной размерности: квантовые ямы, сверхрешетки, квантовые нити, квантовые точки.
3. Техника частотной гребенки (комб-генераторы) на основе непрерывной последовательности сверхкоротких импульсов.

#### Билет №5

1. Дисперсия акустических и оптических фононов. Поляритоны. Дисперсия дипольно-активных колебаний решетки вблизи центра зоны Бриллюэна (фононные поляритоны).
2. Насыщение однородно и неоднородно уширенных переходов. Дырки Беннете. Провал Лэмба и обращенный провал Лэмба.
3. Достижения и применения прецизионной спектроскопии в фундаментальной физике.

#### Билет №6

1. Спектроскопия двухфотонного поглощения, свободная от доплеровского уширения. Условия для реализации прецизионной внутридоплеровской спектроскопии. Сравнение со спектроскопией насыщения.
2. Магнитооптическая ловушка. Часы на атомных фонтанах.
3. Смешанный характер энергии поляритонов. Экситонные поляритоны. Поверхностные поляритоны и их дисперсия.

#### Билет №7

1. Колебания цепочки одинаковых атомов и цепочки, состоящей из атомов двух сортов. Дисперсия акустических и оптических фононов.
2. Экспериментальная реализация спектроскопии насыщения и двухфотонного поглощения и достижения в первых экспериментах с использованием импульсных перестраиваемых лазеров.
3. Техника частотной гребенки (комб-генераторы) на основе непрерывной последовательности сверхкоротких импульсов.

#### Билет №8

1. Описание процесса когерентного антистоксова комбинационного рассеяния света (КАРС) в центросимметричной среде.
2. Некоторые применения методов нелинейной спектроскопии КР в практических задачах по локальной невозмущающей диагностике газовых параметров: Измерение температуры и спектроскопия возбужденных разрядом колебательно-вращательных состояний азота.
3. Частотно-угловые спектры рассеяния и двухфотонного поглощения. Нелинейно-оптическое возбуждение фононных поляритонов - источник для терагерцовой (ТГц) спектроскопии. Некоторые особенности ТГц-спектроскопии.

#### Билет №9

1. Нелинейная поляризация и характерные нелинейно-оптические явления. Связанные волны в нелинейной среде в приближении медленно меняющихся амплитуд.
2. Основные особенности, достоинства и недостатки КАРС спектроскопии. Сравнение методов спектроскопии спонтанного КР, ВКР-усиления и КАРС.
3. Частотно-угловые спектры рассеяния и двухфотонного поглощения.

#### Билет №10

1. Взаимодействие двух электромагнитных волн в условиях близости суммы или разности их частот к частоте собственного возбуждения среды.
2. Спектральное, временное и пространственное разрешение. ИК-КАРС спектрометр.
3. Гиперкомбинационное рассеяние света на фононных и экситонных поляритонах.

#### Билет №11

1. Система уравнений для связанных волн в средах без центра симметрии (с участием поляритонов).
2. Экспериментальная техника нелинейной когерентной спектроскопии.
3. Форма линии. k- и w-спектроскопия экситонных и фононных поляритонов.

#### Билет №12

1. ВКР-усиление и ослабление, спонтанное КР и двухфотонное поглощение в центросимметричных средах. Система уравнений для связанных волн в средах без центра симметрии (с участием поляритонов).
2. Эффективность рассеяния, условия синхронизма, форма линии, связь  $\sigma(3)$  с сечением КР.
3. Частотно-угловые спектры рассеяния и двухфотонного поглощения.

#### Билет №13

1. Связанные волны в нелинейной среде в приближении медленно меняющихся амплитуд.
2. Исследования столкновительных процессов распределения и релаксации вращательной и колебательной энергии молекул методами когерентной спектроскопии рассеяния.
3. Некоторые особенности ТГц-спектроскопии.

#### Билет №14

1. Система уравнений для связанных волн в средах без центра симметрии (с участием поляритонов).
2. Эффективность рассеяния, условия синхронизма, форма линии, связь  $\sigma(3)$  с сечением КР.
3. Измерение температуры и спектроскопия возбужденных разрядом колебательно-вращательных состояний азота. Исследование горения смесей  $\text{CH}_4/\text{O}_2$  и  $\text{O}_2/\text{H}_2$ .

#### Критерии оценивания

Студент получает:

оценку отлично(10), если получены ответы на три вопроса, нет замечаний.

оценку отлично(9), если получены ответы на три вопроса, есть отдельные замечания.

оценку отлично(8), если получены ответы на три вопроса, есть существенные замечания и (или) ошибки в вычислениях.

оценку хорошо(7), если получены ответы на два вопроса, нет замечаний

оценку хорошо(6), если получены ответы на два вопроса, есть отдельные замечания

оценку хорошо(5), если получены ответы на два вопроса, есть существенные замечания и (или) ошибки в вычислениях.

оценку удовлетворительно(4), если получен ответ на один вопрос, нет замечаний

оценку удовлетворительно(3), если получен ответ на один вопрос, есть замечания

оценку неудовлетворительно(2), если правильные ответы на вопросы отсутствуют, но студент понимает и может объяснить смысл вопросов.

оценку неудовлетворительно(1), если правильные ответы на вопросы отсутствуют, студент не может объяснить смысл заданных вопросов.

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

При проведении устного экзамена обучающемуся предоставляется 1 астрономический час на подготовку. Опрос обучающегося по билету на устном экзамене не должен превышать одного астрономического часа.

Во время проведения экзамена обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины, а также справочной литературой, конспектом лекций и персональными компьютерами.