

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

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор физтех-школы физики  
и исследований им. Ландау  
А.В. Рогачев**

|                            |  |
|----------------------------|--|
|                            | <b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>   |
| <b>по дисциплине:</b>      | Основы лазерной спектроскопии  |
| <b>по направлению:</b>     | Прикладные математика и физика   |
| <b>профиль подготовки:</b> | Общая и прикладная физика<br>Физтех-школа физики и исследований им. Ландау<br>кафедра нанооптики и спектроскопии |
| <b>курс:</b>               | 1  |
| <b>квалификация:</b>       | магистр  |

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

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: А.А. Мельников, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры нанооптики и спектроскопии 04.04.2023

## Аннотация

Спектроскопия – это наука об исследовании квантовых объектов с помощью света. «Долазерные» методы ограничивались эмиссионной спектроскопией, абсорбционной спектроскопией и спектроскопией комбинационного рассеяния. Предмет данного курса – наука о новых методах спектроскопии, которые стали возможны только в результате появления лазеров, а также о способах повышения эффективности классических подходов с помощью лазеров. Курс даёт знания об основных фундаментальных процессах в спектроскопии и о методах, позволяющих решать задачи, требующие высокой чувствительности, высокой селективности, высокого спектрального либо временного разрешения. Курс логически развивает «Введение в специальность» (5-6 семестры бакалавриата) и конкретизирует в качестве актуальных примеров некоторые специфические пункты курсов бакалавриата «Атомная спектроскопия» (7-й семестр), «Молекулярная спектроскопия» (8-й семестр), «Квантовая оптика» (8-й семестр), «Физика лазеров» (7-8 семестры).

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

- изучение современных методов спектроскопии с использованием лазеров, с акцентом на те методы, которые до появления лазеров были невозможны. Важность данного курса продиктована необходимостью в подготовке для высшей школы, научных учреждений и промышленности высококвалифицированных специалистов в области современной оптики и спектроскопии, которая немыслима без использования продвинутых лазерных методов.

### Задачи дисциплины

- формирование у студентов знаний по основам теории взаимодействия лазерного излучения с веществом, понимания места многочисленных современных экспериментальных методов, способности самостоятельно ставить и решать конкретные исследовательские задачи.

## 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 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   | ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели |

|   |  |
|---|--|
| изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты   | 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:

- основные концепции, лежащие в основе применения лазерного излучения в спектроскопии различных объектов, теорию фундаментальных процессов в спектроскопии, а также основные методы, демонстрирующие такие качества, как сверхвысокая чувствительность, сверхвысокая селективность, сверхвысокое спектральное разрешение, сверхвысокое временное разрешение.

уметь:

- выбирать адекватный метод для решения конкретной физической задачи.

владеть:

- математическим аппаратом в той мере, которая позволяет получать решение конкретной практической задачи исходя из первых принципов и основных уравнений фундаментальных дисциплин,
- в основном, квантовой механики и электродинамики.

### 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  | Спонтанное излучение.                         | 1   |          |                 | 1              |
| 2  | Индукцированное излучение и поглощение.       | 1   |          |                 | 1              |
| 3  | Правила отбора для излучения и поглощения.    | 1   |          |                 | 1              |
| 4  | Когерентное излучение атомного ансамбля.      | 1   |          |                 | 1              |
| 5  | Когерентное возбуждение.                      | 3   |          |                 | 3              |
| 6  | Квазиэнергия.                                 | 1   |          |                 | 1              |
| 7  | Совместное описание возбуждения и релаксации. | 2   |          |                 | 2              |
| 8  | Многофотонный резонанс.                       | 1   |          |                 | 1              |
| 9  | Спонтанное и вынужденное рассеяние.           | 2   |          |                 | 2              |
| 10 | Когерентное рассеяние.                        | 2   |          |                 | 2              |
| 11 | Фотонное эхо.                                 | 2   |          |                 | 2              |
| 12 | Сверхчувствительное детектирование.           | 1   |          |                 | 1              |
| 13 | Флуоресцентная спектроскопия.                 | 1   |          |                 | 1              |

|                       |  |                    |  |  |    |
|-----------------------|--|--------------------|--|--|----|
| 14                    | Фотоионизационная спектроскопия.                                 | 1                  |  |  | 1  |
| 15                    | Абсорбционная спектроскопия.                                     | 1                  |  |  | 1  |
| 16                    | Другие методы спектроскопии возбуждения.                         | 1                  |  |  | 1  |
| 17                    | От некогерентных методов к когерентным.                          | 1                  |  |  | 1  |
| 18                    | Спектроскопия высокой селективности.                             | 1                  |  |  | 1  |
| 19                    | Исключение спектральной неоднородности.                          | 1                  |  |  | 1  |
| 20                    | Селективность по элементам, соединениям, хромофорам и окружению. | 1                  |  |  | 1  |
| 21                    | Спектроскопия высокого спектрального разрешения.                 | 1                  |  |  | 1  |
| 22                    | Субдоплеровская спектроскопия.                                   | 1                  |  |  | 1  |
| 23                    | Метод разнесенных световых полей.                                | 1                  |  |  | 1  |
| 24                    | Спектроскопия временного разрешения.                             | 1                  |  |  | 1  |
| Итого часов           |  | 30                 |  |  | 30 |
| Подготовка к экзамену |  | 30 час.            |  |  |    |
| Общая трудоёмкость    |  | 90 час., 2 зач.ед. |  |  |    |

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

##### Семестр: 2 (Весенний)

##### 1. Спонтанное излучение.

Скорость спонтанного распада. Метастабильные состояния. Спектр спонтанного излучения. Эффект Доплера и эффект отдачи. Особенности спектра при каскадных переходах с близкой частотой.

##### 2. Индуцированное излучение и поглощение.

Коэффициенты Эйнштейна. Сечение индуцированных переходов. Форма линии поглощения. Кинетика индуцированных переходов. Населённости уровней в стационарном режиме.

##### 3. Правила отбора для излучения и поглощения.

Электродипольное приближение. Правила отбора по четности и угловому моменту. Приближенные правила отбора для атомов и молекул. Примеры слабых переходов. Двухфотонный распад 2s-состояния в атоме водорода.

##### 4. Когерентное излучение атомного ансамбля.

Суперпозиционные состояния. Макроскопическая поляризация. Интенсивность и фаза когерентного излучения. Дифракционная расходимость. Сверхизлучение Дике.

##### 5. Когерентное возбуждение.

Приближение вращающейся волны (резонансное приближение). Уравнения для амплитуд вероятности. Осцилляции Раби в случае точного резонанса.  $\pi/2$ - и  $\pi$ -импульс. Векторная модель. Адиабатическое следование при большой отстройке частоты поля от частоты перехода. Инвертирование населённости при свипировании частоты поля через резонанс.

## 6. Квазиэнергия.

Решения уравнения Шредингера с гамильтонианом, периодически зависящим от времени. Квазиэнергетические состояния. Неоднозначность квазиэнергии. Спектр и скорости спонтанных переходов между квазиэнергетическими состояниями. Реальное и виртуальное возбуждение.

## 7. Совместное описание возбуждения и релаксации.

Кинетические уравнения, описывающие релаксацию населённостей. Матрица плотности. Релаксация недиагональных элементов. Чисто фазовая релаксация. Уравнения Блоха для элементов матрицы плотности. Модель "атом-термостат". Модель "атом-буфер". Переход от когерентного возбуждения к некогерентному. Особенности описания при наличии переходов с близкими частотами.

## 8. Многофотонный резонанс.

Эффективная двухуровневая система. Штарковский сдвиг уровней. Оптимальная частота поля. Многофотонная частота Раби. Адиабатическое инветирование населённости. Бигармоническое возбуждение. Когерентное пленение населённости. Отличие многоступенчатого возбуждения от многофотонного.

## 9. Спонтанное и вынужденное рассеяние.

Упругое рассеяние. Комбинационное (рамановское) рассеяние (КР). Правила отбора. Альтернативный запрет. Стоксово и антистоксово КР. Сечение рассеяния. Резонансное КР. Гиперкомбинационное рассеяние. Вынужденное КР (ВКР). Усиленное ВКР.

## 10. Когерентное рассеяние.

Суперпозиционные состояния на комбинационном (или двухфотонном) переходе. Макроскопическая комбинационная (или двухфотонная) поляризация. Стоксова и антистоксова компоненты когерентного рассеяния при наличии комбинационной поляризации. Условие согласования фаз. Когерентное антистоксово рассеяние света (КАРС). Задержанное КАРС. Четырехволновое смешение. Отражение бегущей волны от стоячей (обращение волнового фронта). Трехволновое смешение в нецентросимметричных средах. Генерация суммарной и разностной частот. Генерация гармоник.

## 11. Фотонное эхо.

Необходимые условия возникновения фотонного эха. Двухимпульсное эхо. Векторная модель. Отсутствие эха для гармонического осциллятора. Двухимпульсное эхо в трёхуровневой системе. Варианты трёхимпульсного эха. Индуцированное (стимулированное) эхо. Использование фотонного эха для измерения релаксационных процессов.

## 12. Сверхчувствительное детектирование.

Применения в задачах атомной, молекулярной и ядерной физики, аналитической химии, геохимии, контроля окружающей среды, биологии и медицины. Проблема детектирования единичных атомов и молекул. Спектроскопия возбужденных состояний. Дистанционное зондирование. Лидары.

## 13. Флуоресцентная спектроскопия.

Квантовый выход флуоресценции. Измерение спектров одно- и двухфотонного возбуждения. Измерение спектров флуоресценции. Предельная чувствительность метода при циклическом взаимодействии. Детектирование одиночных атомов. Наблюдение квантовых скачков. Наблюдение одиночных молекул в матрицах. Особенности флуоресцентного метода в инфракрасном (ИК) диапазоне. Ап-конверсия.

#### 14. Фотоионизационная спектроскопия.

Основные схемы возбуждения. Эффективные способы фотоионизации из возбужденных состояний атомов. Использование автоионизационных состояний. Использование ридберговских состояний. Детектирование одиночных атомов. Спектроскопия редких радиоактивных изотопов. Десорбционно-фотоионизационная спектроскопия с использованием времяпролетной масс-спектрометрии. Увеличение квантового выхода фотоионизации молекул при использовании ультракоротких лазерных импульсов.

#### 15. Абсорбционная спектроскопия.

Стационарное поглощение. Измерение пропускания. Многопроходные кюветы. Внутривибрационный метод. Квантовый шум и предельная чувствительность абсорбционной спектроскопии. Измерение слабого сигнала на сильном фоне как основная принципиальная трудность.

#### 16. Другие методы спектроскопии возбуждения.

Оптомеханический метод. Опторифракционные методы. Тепловая линза. Фазочувствительное детектирование. Оптоакустический метод. Оптогальванический метод. Фотоотклонение.

#### 17. От некогерентных методов к когерентным.

Регистрация когерентного излучения на долгоживущих (в частности, ИК) переходах. Гетеродинамирование сигнала. Детектирование в плазмах, флуоресцирующих средах и плазме. Чувствительность метода КАРС по сравнению со спонтанным КР. Когерентное гипер-КР для измерения спектров "молчащих" колебательных мод в молекулах.

#### 18. Спектроскопия высокой селективности.

Дифференцирование спектра как общий метод подавления широкого бесструктурного неселективного резонансного фона. Интерферометрия. Частотная модуляция. Штарковская спектроскопия. Магнитный резонанс. Поляризационная спектроскопия. Фарадеевская спектроскопия. Применение методов дифференцирования спектра в задачах абсорбционной спектроскопии и спектроскопии усиленного ВКР. Стробирование во времени как общий метод подавления нерезонансного неселективного фона. Задержанная флуоресценция. Задержанное КАРС.

#### 19. Исключение спектральной неоднородности.

Измерение однородного уширения линии; измерение фундаментальной частоты перехода; обнаружение структуры, скрытой неоднородным уширением. Методы двойного резонанса. Эффект Ханле. Метод квантовых биений. Применения фотонного эха.

#### 20. Селективность по элементам, соединениям, хромофорам и окружению.

Задача селективного детектирования малых концентраций в присутствии фона с близко расположенными линиями поглощения. Использование дополнительных селективных процессов: многоступенчатое возбуждение, масс-спектрометрия, хроматография. Создание искусственного изотопического сдвига при ускорении пучков. Применение резонансного КР для селективного детектирования хромофоров. Неоднородное уширение спектров молекул в конденсированной фазе. Фотохимическое выжигание провалов. Генерация 2-ой гармоники на поверхности.

## 21. Спектроскопия высокого спектрального разрешения.

Общие цели получения узких резонансов. Прецизионные измерения спектроскопических постоянных. Сверхтонкая и изотопическая структура. Исследование эффектов Штарка и Зеемана. Измерение Лэмбовского сдвига. Измерение физических постоянных. Лазерная метрология. Стандарты частоты. Применение атомных и молекулярных пучков, охлажденных молекулярных струй. Сужение распределения по скоростям при ускорении пучков. Лазерное охлаждение ионов в ловушках. Замедление и охлаждение атомных пучков резонансным световым давлением. Лазерные ловушки для атомов. Методы получения бесфонных линий в конденсированной фазе.

## 22. Субдоплеровская спектроскопия.

Приложение общих методов исключения спектральной неоднородности. Узкие резонансы в спектроскопии насыщения. Лэмбовский провал. Узкий резонанс в стоячей волне на двухфотонном переходе.

## 23. Метод разнесенных световых полей.

Пролетное уширение линий. Схема Рамзи для устранения пролетного уширения. Идея Рамзи в сочетании с методами когерентной спектроскопии. Узкий резонанс эхо-сигнала когерентного излучения в результате пролета через разнесенные световые лучи.

## 24. Спектроскопия временного разрешения.

Наблюдение динамики в реальном времени и задачи атомной и молекулярной спектроскопии, химической физики, физики конденсированных сред, биофизики. Релаксация отдельных состояний. Измерение времен жизни. Применение когерентных эффектов. Индуцированное фотонное эхо. Вращательная и колебательная релаксация в молекулярных газах, передача возбуждения. Применение методов двойного резонанса. Релаксация поляризации. Задачи, требующие пикосекундного и субпикосекундного временного разрешения. Релаксация электронного возбуждения в молекулах и конденсированных средах. Молекулярная динамика. Мономолекулярный распад. Внутримолекулярная релаксация колебательной энергии. Спектроскопия и диагностика короткоживущих фрагментов и промежуточных состояний. Перенос энергии и диффузия в конденсированных средах. Стадии фотостимулированных превращений в биологических системах. Фотосинтез. Многообразие применяемых методов: флуоресцентная, фотоионизационная и абсорбционная спектроскопия, спектроскопия КР, когерентная спектроскопия. Ультракороткие лазерные импульсы.

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

Учебная аудитория, оснащенная доской, мелом, проектором и экраном.

## 6. Перечень рекомендуемой литературы

### Основная литература

1. Лазерная спектроскопия. Основные принципы и техника эксперимента [Текст]/В. Демтрёдер, -М., Наука, 1985
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. Нелинейная лазерная спектроскопия сверхвысокого разрешения [Текст]/В. С. Летохов, В. П. Чеботаев, -М., Наука, 1990
4. Атомная физика. Освоение через задачи [Текст], Atomic physics An Exploration Through Problems and Solutions/Д. Будкер [и др.] , -М., Физматлит, 2010

#### Дополнительная литература

1. Лазерная спектроскопия атомов и молекул [Текст] = Laser spectroscopy of atoms and molecules/под ред. Г. Вальтера , -М., Мир, 1979
2. Нелинейная спектроскопия [Текст], монография/под ред. Н. Бломбергена , -М., Мир, 1979
3. Лазерная и когерентная спектроскопия [Текст]/под ред. Дж. Стейнфелда , -М., Мир, 1982
4. Лазерная аналитическая спектроскопия [Текст]/отв. ред. В. С. Летохов , -М., Наука, 1986
5. Лазерная пикосекундная спектроскопия и фотохимия биомолекул [Текст]/отв. ред. В. С. Летохов , -М., Наука, 1987

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

1. <http://lib.mipt.ru/catalogue/1447/?t=764> – электронная библиотека Физтеха, раздел «Оптика».
2. <http://lib.mipt.ru/catalogue/94/?t=748> – электронная библиотека Физтеха, раздел «Физика».
3. <http://benran.ru> –библиотека по естественным наукам Российской академии наук.

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

Демонстрация презентаций с помощью проектора.

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

Курс является междисциплинарным и объединяет знания из различных областей физики. Студент, изучающий курс, должен овладеть общим понятийным аппаратом и научиться применять теоретические знания при выборе метода исследования для решения конкретной физической задачи, требующей применения лазера в качестве инструмента для спектроскопии. В ходе изучения дисциплины студент должен самостоятельно пополнять свои знания в рамках ранее изученных дисциплин: классической электродинамики, физической и волновой оптики, квантовой механики и основ квантовой электродинамики, атомной и молекулярной физики. Успешное освоение курса требует работы студента непосредственно на лекции, а также самостоятельной работы для усвоения пройденного материала.



**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

|                            |  |
|----------------------------|--|
| <b>по направлению:</b>     | Прикладные математика и физика   |
| <b>профиль подготовки:</b> | Общая и прикладная физика<br>Физтех-школа физики и исследований им. Ландау<br>кафедра нанооптики и спектроскопии |
| <b>курс:</b>               | 1  |
| <b>квалификация:</b>       | магистр  |

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

**Разработчик:** А.А. Мельников, 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 «Основы лазерной спектроскопии» обучающийся должен:

### знать:

- основные концепции, лежащие в основе применения лазерного излучения в спектроскопии различных объектов, теорию фундаментальных процессов в спектроскопии, а также основные методы, демонстрирующие такие качества, как сверхвысокая чувствительность, сверхвысокая селективность, сверхвысокое спектральное разрешение, сверхвысокое временное разрешение.

### уметь:

- выбирать адекватный метод для решения конкретной физической задачи.

### владеть:

- математическим аппаратом в той мере, которая позволяет получать решение конкретной практической задачи исходя из первых принципов и основных уравнений фундаментальных дисциплин,
- в основном, квантовой механики и электродинамики.

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

Используются контрольные вопросы на лекциях. Примерный перечень вопросов:

1. Чем определяется сдвиг центральной частоты спектра спонтанного излучения от частоты перехода?
2. Для каких трёх квантовых чисел правила отбора относительно излучения и поглощения света являются строгими в электро-дипольном приближении?
3. При каких условиях когерентное излучение ансамбля возбуждённых атомов сильнее спонтанного?
4. В чём отличие виртуального и реального возбуждения уровней квантовой системы в лазерном поле?
5. Всегда ли стоксово комбинационное рассеяние сильнее антистоксова?
6. Какой метод лазерной спектроскопии целесообразно использовать для измерения колебательно-вращательного спектра моды молекулы, переходы в которой одновременно запрещены относительно поглощения и комбинационного рассеяния?
7. Какая релаксационная константа измеряется при применении двухимпульсного фотонного эха?

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

1. Использование эффекта фотонного эха для измерения скоростей релаксационных процессов.
2. Эффективные способы фотоионизации из возбужденных состояний атомов.
3. Опотермический и опторефракционный методы.
4. Правила отбора для излучения и поглощения по четности и угловому моменту. Приближенные правила отбора.
5. Внутридоплеровская спектроскопия. Узкие резонансы в спектроскопии насыщения.
6. Методы генерации ультракоротких лазерных импульсов. Активная и пассивная синхронизация мод.
7. Когерентное антистоксово рассеяние света. Основные схемы эксперимента.
8. Фотонное эхо. Объяснение эффекта в рамках векторной модели.
9. Оптоакустическая спектроскопия. Область применения. Способы увеличения чувствительности.

Примеры экзаменационных билетов:

Билет 1.

1. Когерентное антистоксово рассеяние света. Основные схемы эксперимента.
2. Фотонное эхо. Объяснение эффекта в рамках векторной модели.
3. Оптоакустическая спектроскопия. Область применения. Способы увеличения чувствительности.

Билет 2.

1. Правила отбора для излучения и поглощения по четности и угловому моменту. Приближенные правила отбора.
2. Внутридоплеровская спектроскопия. Узкие резонансы в спектроскопии насыщения.
3. Методы генерации ультракоротких лазерных импульсов. Активная и пассивная синхронизация мод.

Билет 3.

1. Использование эффекта фотонного эха для измерения скоростей релаксационных процессов.
2. Эффективные способы фотоионизации из возбужденных состояний атомов.
3. Опотермический и опторефракционный методы.

## Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

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

Экзамен проводится в устной форме по билетам. В каждом билете представлено три вопроса. При проведении экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося не должен превышать одного астрономического часа.