

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова
Филиал Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова
в городе Сарове

«УТВЕРЖДАЮ»



Директор филиала МГУ в г.Сарове
Член-корреспондент РАН В.В. Воеводин

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Наименование дисциплины:

Лазерная спектроскопия

Уровень высшего образования:

Магистратура

Направление подготовки:

03.04.02 Физика

Направленность (профиль) ОПОП:

Экстремальные электромагнитные поля, релятивистская плазма
и аттосекундная физика

Квалификация «Магистр»

Форма обучения: Очная

Саров 2021 г.

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлению подготовки 03.04.02 Физика в редакции приказа по МГУ от 30 декабря 2020 г. №1366.

Авторы–составители:

д.ф.-м.н., Профессор физического факультета МГУ Д.Ю. Парашук

Аннотация к рабочей программе дисциплины

«Лазерная спектроскопия»

В курсе изучаются основы взаимодействия электромагнитного излучения с веществом; аппаратура, техника и методы лазерной спектроскопии; принципы спектроскопии высоких чувствительности, селективности, спектрального, временного и пространственного разрешения. Описаны методы спектроскопии рассеяния, поглощения, фотолюминесценции, когерентной и нелинейной спектроскопии, даны примеры применений в газах, конденсированных системах и плазме. Даны примеры приложений методов лазерной спектроскопии в физике, химии, материаловедении и науках об окружающей среде.

Разделы рабочей программы

- 1.** Место дисциплины в структуре основной профессиональной образовательной программы высшего образования (ОПОП ВО).
- 2.** Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия (при наличии)
- 3.** Результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с формируемыми компетенциями
- 4.** Форма обучения.
- 5.** Язык обучения.
- 6.** Содержание дисциплины.
- 7.** Объем дисциплины
- 8.** Структурированное по темам (разделам) содержание дисциплины (модуля) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий
- 9.** Текущий контроль и промежуточная аттестация.
- 10.** Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).
- 11.** Шкала оценивания.
- 12.** Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.
- 13.** Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.
- 14.** Материально-техническая база, информационные технологии, программное обеспечение и информационные справочные системы

1. Место дисциплины в структуре ОПОП ВО

Дисциплина «Лазерная спектроскопия» реализуется на 1-ом курсе в 2-ом семестре и относится к обязательной части программы обучения.

В результате освоения дисциплины «Лазерная спектроскопия» обучающийся кроме знаний предмета получает навыки применения ранее полученных знаний для решения новых научных и практических задач.

2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия

Освоение дисциплин «Электромагнетизм», «Электродинамика», «Оптика», «Математический анализ», «Квантовая механика», «Дифференциальные уравнения», «Теория колебаний», «Теория волн».

3. Результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с формируемыми компетенциями

В результате освоения дисциплины у обучающихся должны быть сформированы:

Формируемые компетенции (код компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю)
<ul style="list-style-type: none">Способность использовать знания современных проблем и новейших достижений в области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики в своей научно-исследовательской деятельности (СПК-1).	<p>ЗНАТЬ основные законы и направления современных научных исследований в области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики.</p> <p>УМЕТЬ на основе фундаментальных знаний в области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики, определять возможные направления научных исследований.</p> <p>ВЛАДЕТЬ необходимой информацией из современных отечественных и зарубежных источников по тематике избранного направления исследования области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики.</p>
<ul style="list-style-type: none">Способность организовать и планировать физические исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики и решать их с помощью современной аппаратуры, оборудования и информационных технологий (СПК-2).	<p>ЗНАТЬ базовые принципы организации научных исследований с использованием информационных технологий, основные методики работы на современном научном оборудовании в области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики.</p> <p>УМЕТЬ используя знания в области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики проводить научные исследования.</p> <p>ВЛАДЕТЬ навыками планирования научного исследования, анализа получаемых результатов, обобщения, оформления и публичного представления полученных результатов.</p>
<ul style="list-style-type: none">Способность определять основные направления внедрения научных результатов в области экстремальных	<p>ЗНАТЬ основные направления инновационного развития в области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики.</p> <p>УМЕТЬ проводить необходимый анализ современных тенденций научных инноваций в области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и</p>

<p>электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики (СПК-3).</p>	<p>аттосекундной физики для подготовки предложений по внедрению полученных научных результатов. ВЛАДЕТЬ методами обоснования возможного применения полученных научных результатов с учетом современных достижений в области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики.</p>
--	--

4. **Форма обучения:** очная

5. **Язык обучения:** русский

6. **Содержание дисциплины:**

Тема 1. Предмет лазерной спектроскопии

Введение. Цели и задачи оптической спектроскопии, ее объекты. Методы оптической спектроскопии: чувствительность, селективность, спектральное, временное и пространственное разрешение. Характеристики лазерного излучения, лазерные пучки и импульсы. Сравнение лазерных и нелазерных источников излучения для задач оптической спектроскопии. Спектральные, временные и интенсивностные диапазоны лазерной спектроскопии. Преимущества лазерной спектроскопии и ее недостатки.

Тема 2. Поглощение, излучение и рассеяние оптического излучения

Основные понятия. Коэффициенты Эйнштейна. Сечение поглощения. Дипольный момент перехода. Сила осциллятора. Правило сумм. Формы линии поглощения. Соотношения Крамерса-Кронига. Диэлектрическая проницаемость и ее спектр. Закон Бугера-Ламберта-Бера. Оптическая плотность и коэффициент поглощения. Мутные среды. Фотолюминесценция: флуоресценция и фосфоресценция. Излучательная и безызлучательная релаксация возбужденных состояний. Квантовый выход фотолюминесценции. Спектры поглощения и люминесценции молекул и конденсированных сред. Приближение Кондона и Герцберга-Теллера. Принцип Франка-Кондона и факторы Хуанга-Риса. Симметрия и правила отбора для оптических переходов. Двухфотонные и многофотонные переходы. Двухуровневая система. Матрица плотности.

Тема 3. Аппаратура оптической спектроскопии

Типы лазерных источников излучения для задач спектроскопии. Нелазерные источники излучения света для спектроскопии: тепловые источники, газоразрядные лампы и светодиоды. Поляризационные устройства: пленочные поляризаторы и поляризационные призмы. Волновые пластинки. Поглощающие и интерференционные фильтры. Монохроматоры. Способы регулировки интенсивности оптического излучения. Приемники оптического излучения: болометры, фоторезисторы, фотодиоды, фотоэлектронные умножители. Детекторы изображений, ПЗС. Усилители яркости. Модуляторы оптического излучения: механические, акусто- и электрооптические. Методики и техники измерений с короткими световыми импульсами. Стрик-камеры. Техники обработки сигналов фотоприемников: синхронное детектирование, стробирование, счет фотонов. Время-коррелированный счет фотонов.

Тема 4. Спектроскопия рассеяния света

Упругое и неупругое рассеяние. Сечение рассеяния. Комбинационное (рамановское) рассеяние (КР). Стоксово и антистоксово КР. Резонансное КР. КР спектроскопия и микроскопия. Гиперкомбинационное рассеяние. Вынужденное КР. Когерентное антистоксово рассеяние света (КАРС), КАРС-спектроскопия. Резонансное КР. Гигантское КР, применение для задач КР спектроскопии (SERS). КР микроскопия с нанометровым

пространственным разрешением (TERS). Спектроскопия КР с временным разрешением. Корреляционная спектроскопия: динамическое светорассеяние, доплеровская анемометрия.

Тема 5. Спектроскопия высокой чувствительности

Задачи сверхчувствительного детектирования: детектирование единичных атомов и молекул, запрещенных переходов в различных системах, примесей и дефектных состояний в конденсированных средах. Фотолюминесцентная спектроскопия, однофотонное и двухфотонное возбуждение. Спектроскопия возбуждения фотолюминесценции. Фотолюминесцентная микроскопия. Одиночные люминофоры, квантовые скачки. Фотоионизационная спектроскопия, ее комбинация с масс-спектроскопией. Абсорбционная спектроскопия, внутрирезонаторные методы. Фототепловая и фотоакустическая спектроскопия. Оптогальваническая и оптотермическая спектроскопия. Сравнение различных методов спектроскопии для достижения высокой чувствительности.

Тема 6. Спектроскопия высокого разрешения

Газовые среды: доплеровское уширение и методы спектроскопии, свободные от него. Спектроскопия насыщения и выжигание провалов Беннета и Лэмба. Двухфотонное возбуждение. Методы двойного резонанса. Методы спектроскопии, основанные на эффекте Штарка и Зеемана. Магнитный резонанс и его комбинация с лазерными методами. Методы спектроскопии, основанные на генерации второй оптической гармоники от поверхности.

Тема 6. Когерентная спектроскопия

Квантовые биения и их применение в спектроскопии. Площадь импульса, пи-импульсы. Электромагнитно-индуцированная прозрачность. Оптические нутации, затухание свободной поляризации, фотонное эхо. Лазерная эхо-спектроскопия. Темные резонансы и примеры спектроскопии на их основе. Когерентное пленение населенностей. Принципы и методы 2D спектроскопии.

Тема 7. Спектроскопия с временным разрешением

Задачи исследования временной динамики в различных средах. Релаксация возбужденных состояний, времена жизни. Спектроскопия возбужденных состояний. Задержанная люминесценция. Задачи спектроскопии со сверхкороткими импульсами. Молекулярная динамика. Перенос энергии и заряда в конденсированных средах. Спектроскопия фотоиндуцированного поглощения и фотолюминесценции с временным разрешением до фемтосекундного диапазона.

Тема 8. Применения лазерной спектроскопии

Лазерное охлаждение атомов, молекул и конденсированных сред. Детектирование одиночных молекул. Терагерцовая спектроскопия и примеры ее применения. Аттосекундная спектроскопия. Спектроскопия ридберговских состояний. Прецизионная лазерная спектроскопия, оптические гребенки и их применения. Оптоакустическая и фототепловая спектроскопия, примеры применения. Зондирование атмосферы, лидары. Лазерная спектроскопия в химии и материаловедении. Понятие о 2D спектроскопии с высоким временным разрешением. Примеры применения лазерной спектроскопии в биологии и медицине.

7. Объем дисциплины

НАЗВАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	Трудоемкость в зачетных единицах	объем учебной нагрузки в ак. часах					Самостоя- тельная работа студентов
		Общая трудоемкос- ть	В том числе				
			ауд. занятий				
		Об- щая ауд. ито- говая нагр. узка	Лек- ций	Се- мин- ары	В		
Лазерная спектроскопия	2	72	36	18	18	36	

8. Структурированное по темам (разделам) содержание дисциплины (модуля) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий

Изучение курса «Лазерная спектроскопия» включает в себя лекции, на которых рассматривается теоретическое содержание курса, обсуждение вопросов, обозначенных в темах курса; самостоятельную работу, заключающуюся в подготовке к занятиям, выполнение домашних заданий и выступление с краткими презентациями по заранее выбранным темам. По вопросам, вызывающим затруднения, проводятся консультации.

№ темы	Наименование раздела дисциплины	Виды учебной нагрузки и их трудоемкость, часы					Форма текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации
		Всего часов	Лекции	Научно- практические	Семинары	Самостоятельная работа	
1	Предмет лазерной спектроскопии	8	3		3	4	Собеседование, опрос
2	Поглощение, излучение и рассеяние оптического излучения	8	2		2	4	
3	Аппаратура оптической спектроскопии	8	2		2	4	

4	Спектроскопия рассеяния света	8	2	2	4	
5	Спектроскопия высокой чувствительности	8	2	2	4	
6	Когерентная спектроскопия	8	2	2	4	
7	Спектроскопия с временным разрешением	12	2	2	6	
8	Применения лазерной спектроскопии	12	3	3	6	
	Промежуточная аттестация	4			4	зачет в устной форме
ИТОГО:		72	18	18	36	

9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.

Текущий контроль по дисциплине «Лазерная спектроскопия» осуществляется на лекциях и заключается в оценке активности слушателей, качества ответов на вопросы лектора, аргументированности позиции студента, оценивается широта используемых им теоретических знаний. В семестре в конце некоторых лекций проводятся несколько коротких контрольных работ (10 – 15 минут).

Промежуточная аттестация по дисциплине «Лазерная спектроскопия» проводится в форме зачета. Результаты сдачи экзамена оцениваются по шкале «неудовлетворительно», «удовлетворительно», «хорошо», «отлично». Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

10. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).

Требования к структуре и содержанию фонда оценочных средств текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине

Перечень оценочных средств, применяемых на каждом этапе проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине, представлены в таблице

Наименование оценочного средства	Краткая характеристика оценочного средства	Представление оценочного средства в фонде
Оценочные средства текущего контроля		
Тематический опрос (в форме ответов на вопросы)	Средство контроля, организованное как короткий письменный ответ на поставленный вопрос по тематике предыдущей или текущей лекции, рассчитанное на выяснение объема и качества знаний, усвоенных обучающимися по определенному разделу, теме, проблеме.	Перечень тем, изучаемых в рамках дисциплины

Собеседование (в форме беседы, дискуссии по теме)	Средство контроля, организованное как свободная беседа, дискуссия по тематике изучаемой дисциплины, рассчитанное на выяснение объема знаний обучающегося по всем изученным разделам, темам; свободного использования терминологии для аргументированного выражения собственной позиции.	Перечень тем, изучаемых в рамках дисциплины
Оценочные средства промежуточной аттестации		
Короткая письменная работа	Средство, позволяющее оценить сформированность систематических представлений о методах научно-исследовательской деятельности.	Перечень вопросов к зачету

11. Шкала оценивания.

Планируемые результаты обучения	Критерии оценивания результатов обучения			
	2	3	4	5
ЗНАТЬ: принципы и методы лазерной спектроскопии ОПК-3.Б 3-6	Отсутствие знаний принципов и методов лазерной спектроскопии	В целом успешные, но не систематические знания принципов и методов лазерной спектроскопии	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы знания принципов и методов лазерной спектроскопии	Успешные и систематические знания принципов и методов лазерной спектроскопии
УМЕТЬ: работать с данными лазерной спектроскопии ОПК-3.Б У-6	Отсутствие умения работать с данными лазерной спектроскопии	В целом успешное, но не систематическое умение работать с данными лазерной спектроскопии	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение работать с данными лазерной спектроскопии	Успешное и систематическое умение работать с данными лазерной спектроскопии
ВЛАДЕТЬ: техниками лазерной спектроскопии ОПК-3.Б В-6	Отсутствие/фрагментарное владение техниками лазерной спектроскопии	В целом успешное, но не систематическое владение техниками лазерной спектроскопии	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы владение техниками	Успешное и систематическое владение техниками лазерной спектроскопии

			лазерной спектроскопии	
--	--	--	---------------------------	--

12. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.

Материалы текущего контроля успеваемости обучающихся:

Пример:

1. Для фактора Хуанга-Риса равным единице изобразить графически интенсивности электронно-колебательных линий в спектрах поглощения и люминесценции двухатомной молекулы. Уширения не учитывать.
2. Рассчитать силу осциллятора для оптического перехода с резонансной энергией 2 эВ и излучательным временем жизни 1 нс.
3. Рассчитать излучательное время жизни двухуровневой системы с резонансной энергией 2 эВ и дипольным моментом перехода 1 Д.
4. Рассчитать частоту Раби для лазерного поля интенсивностью 10 МВт и оптического перехода дипольным моментом 1 Д.
5. Рассчитать квантовый выход фотолюминесценции для оптического перехода с излучательным временем жизни 1 нс и скоростью безызлучательной релаксации 1 нс^{-1} .

13. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.

Материалы промежуточного контроля успеваемости обучающихся в форме зачета:

1. Коэффициенты Эйнштейна.
2. Сила осциллятора оптического перехода. Дипольный момент перехода.
3. Чувствительность, селективность, спектральное, временное и пространственное разрешение как характеристики метода лазерной спектроскопии.
4. Двухуровневая система. Матрица плотности.
5. Тепловые и люминесцентные источники излучения.
6. Болومتر. Фотоэлектрические приемники излучения. Их основные параметры.
7. ПЗС для спектроскопии и их основные характеристики.
8. Оптические фильтры. Типы и характеристики.
9. Поляризационные устройства для оптических измерений.
10. Волновые пластинки. Типы и характеристики.
11. Метод внутррезонаторной лазерной спектроскопии.
12. Эффект Штарка и его применение в спектроскопии.
13. Эффект Зеемана и его применение в спектроскопии.
14. Фотонное эхо и принципы эхо-спектроскопии в оптическом диапазоне.
15. Нелинейная спектроскопия без доплеровского уширения. Спектроскопия насыщения поглощения.
16. Электромагнитно-индуцированная прозрачность. Оптическая нутация и затухание свободной поляризации.
17. Спектроскопия высокого временного разрешения и примеры ее реализации.
18. Оптоакустическая лазерная спектроскопия и примеры ее применения.
19. Фотолюминесцентная лазерная спектроскопия и примеры ее применения.
20. Спектроскопия комбинационного рассеяния света и примеры ее применения.
21. Активная спектроскопия комбинационного рассеяния света и примеры ее применения.

22. Принципы, методики и примеры спектроскопии по методу «возбуждение-зондирование».
23. Лазерное зондирование атмосферы.
24. Лазерная фотохимия и лазерное разделение изотопов.
25. Принципы лазерного охлаждения. Современные достижения в области лазерного охлаждения газов и конденсированных сред.
26. Диагностика возбужденных состояний в конденсированных средах – от фемтосекунд до секунд.
27. Принципы фототепловой спектроскопии и примеры ее применения.
28. Принципы лазерной ионизационной спектроскопии и примеры ее реализации.
29. Методы спектроскопии, принципиально осуществимые только с помощью лазеров.

14. Материально-техническая база, информационные технологии, программное обеспечение и информационные справочные системы

Основная литература.

1. Demtroder W. Laser Spectroscopy 1. Fifth Edition. Springer, 2014.
<https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-642-53859-9> (доступ из МГУ)
2. Demtroder W. Laser Spectroscopy 2. Fifth Edition. Springer, 2015.
<https://www.springer.com/gp/book/9783662446409> (доступ из МГУ)
3. Lakowicz, J. R. Principles of fluorescence spectroscopy. Springer, 2006.
<https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-0-387-46312-4> (доступ из МГУ)
4. Ельяшевич М.А. Атомная и молекулярная спектроскопия. М.: Эдиториал УРСС. 2001.

Дополнительная литература.

1. Лоудон Р. Квантовая теория света. пер. с англ. М.: Мир, 1976.
2. Летохов В.С., Чеботаев В.П. Нелинейная лазерная спектроскопия сверхвысокого разрешения. М.: Наука, 1990.
3. Летохов В.С. Лазерная фотоионизационная спектроскопия, М.: Наука, 1987.
4. Стенхольм С. Основы лазерной спектроскопии, пер. с англ. М.: Мир, 1987.
5. Аллен Л., Эберли Дж. Оптический резонанс и двухуровневые атомы. пер. с англ. М.: Мир, 1978.
6. Шен И.Р. Принципы нелинейной оптики, пер. с англ. М.: Наука, 1989.
7. Ахманов С.А., Коротеев Н.И. Методы нелинейной оптики в спектроскопии рассеяния света. М.: Наука, 1981.
8. Гусев В.Э., Карабутов А.А. Лазерная оптоакустика. М.: Наука, 1991.

Интернет-ресурсы.

- https://en.wikipedia.org/wiki/Ultrafast_laser_spectroscopy

Материально-техническое обеспечение

В соответствии с требованиями п.5.3. образовательного стандарта МГУ по направлению подготовки «Физика».

Для лекционной части курса требуются аудитория, оборудованная мультимедийным проектором, управляющим компьютером, экраном и обычной учебной доской.