

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:

НЕЛИНЕЙНАЯ ЛАЗЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ И ДИАГНОСТИКА ЕСТЕСТВЕННЫХ
СРЕД

Уровень высшего образования:

Магистратура

Направление подготовки:

03.04.02 Физика

Направленность (профиль) ОПОП:

Лазерная нелинейная оптика и фотоника

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:

К.ф.-м.н., доцент Алексей Владимирович Карговский, кафедра общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ

Аннотация к рабочей программе дисциплины

«Нелинейная лазерная спектроскопия и диагностика естественных сред»

Дисциплина обеспечивает теоретическую подготовку в области нелинейной лазерной спектроскопии (НЛС). Дисциплина по выбору читается на 1м году обучения в 2 ом семестре

НЛС – это раздел физики, использующий нелинейные оптические явления для получения информации о строении вещества и процессах, протекающих в нем. В более широком смысле НЛС – это раздел резонансной нелинейной оптики. Оптическая, ИК-, рентгеновская и радиоспектроскопия дают большинство информации о строении вещества. Особенность оптической спектроскопии (с примыкающими ближним ИК и ультрафиолетовым диапазонами) состоит в том, что значительная часть структурно организованной материи излучает в оптическом диапазоне. Именно поэтому в настоящее время оптическая спектроскопия используется достаточно широко для диагностики естественных сред. В данном курсе рассматриваются нелинейные явления в резонансных условиях, и на этой основе строятся некоторые методы стационарной и нестационарной нелинейной лазерной спектроскопии.

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

В результате освоения дисциплины «Нелинейная лазерная спектроскопия и диагностика естественных сред» 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 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)
Способность использовать знания современных проблем и новейших достижений в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники в своей научно-исследовательской деятельности (СПК-1)	<p>Знать основные законы и направления современных научных исследований в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники.</p> <p>Уметь на основе фундаментальных знаний в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники, определять возможные направления научных исследований.</p> <p>Владеть необходимой информацией из современных отечественных и зарубежных источников по тематике избранного направления исследования в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники.</p>
Способность организовать и планировать физические исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники 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 лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники.</p> <p>Уметь используя знания в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники проводить научные исследования.</p> <p>Владеть навыками планирования научного исследования, анализа получаемых результатов, обобщения, оформления и публичного представления полученных результатов.</p>

<p>Способность определять основные направления внедрения научных результатов в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники (СПК-3).</p>	<p>Знать основные направления инновационного развития в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники.</p> <p>Уметь проводить необходимый анализ современных тенденций научных инноваций в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники для подготовки предложений по внедрению полученных научных результатов.</p> <p>Владеть методами обоснования возможного применения полученных научных результатов с учетом современных достижений в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники.</p>
---	---

4. **Форма обучения:** очная

5. **Язык обучения:** русский

6. **Содержание дисциплины:**

Тема 1. Методы линейной спектроскопии

Роль спектроскопии в науке. Основные методы линейной спектроскопии, их ограничения и трудности. Лазеры в линейной спектроскопии. Методы линейной спектроскопии, свободной от доплеровского уширения. Некоторые задачи нелинейной спектроскопии и резонансной нелинейной оптики.

Тема 2. Формализм матрицы плотности

Уравнение фон Неймана. Усреднение по состояниям термостата. Интегриродифференциальные уравнения для матрицы плотности. Немарковость релаксации. Зависимость релаксации от падающих полей. Кинетические дифференциальные уравнения для матрицы плотности и условия их применимости.

Тема 3. Двухуровневая система

Двухуровневое приближение в теории резонансных взаимодействий. Уравнения для двухуровневой системы (ДС). Времена релаксации. Векторное представление ДС. Вектор Блоха. Динамика ДС в поле коротких импульсов. Осцилляции Раби. ДС в поле квазимонохроматического излучения. Вероятности переходов. Эффект насыщения. Решения Торри для переходных процессов. Волновые уравнения для резонансных полей.

Тема 4. Спектроскопия насыщения

Поляризация среды при неоднородном уширении. Насыщение в неоднородно уширенной линии. Дырки Беннета. Провал Лэмба. Принцип спектроскопии насыщения. Модель выжигания дырок. Основные экспериментальные методы. Применение спектроскопии насыщения в фундаментальной физике.

Тема 5. Влияние сильного поля на структуру спектра

Уравнения для двухуровневой системы в поле двух волн. Установившееся решение. Поляризация ансамбля ДС. Спектр поглощения слабой волны в присутствии сильной.

Интерпретация спектров. Модели “голоого” и “одетого” атомов. О спектре спонтанного испускания ДС в сильном резонансном поле. О спектре трехуровневой системы.

Тема 6. Многофотонные резонансные процессы

Виды многофотонных процессов. Метод усреднения применительно к уравнениям для матрицы плотности. Уравнения для обобщенной двухуровневой системы. Гамильтониан усредненного движения. Динамический эффект Штарка. Поляризация среды при наличии многофотонных резонансов. Уравнения для амплитуд полей.

Тема 7. Спектроскопия многофотонного возбуждения

Вероятности многофотонных переходов. Правила отбора. Методы многофотонной спектроскопии: фотолюминесцентный, фотоионизационный и др. Многофотонная спектроскопия, свободная от доплеровского уширения. Двухфотонная спектроскопия сверхвысокого разрешения в фундаментальной физике.

Тема 8. Двухфотонное поглощение

Уравнения распространения полей в двухфотонно поглощающих средах. Квазистационарное приближение. Эффект насыщения. Коэффициент поглощения и показатель преломления. Поляризационные эффекты. Методы спектроскопии двухфотонного поглощения.

Тема 9. Вынужденное комбинационное рассеяние

Двухволновая модель вынужденного комбинационного рассеяния. Система уравнений для ВКР. Усиление и преломление стоксовой волны при ВКР. Спектроскопия ВКР-усиления. Интерференционный метод.

Тема 10. Параметрические процессы в резонансных условиях

Виды параметрических резонансных процессов. Сопутствующие эффекты. Поляризация вещества. Учет нерезонансной восприимчивости. Многоканальное возбуждение. Интерференционные эффекты. Интерференционное (параметрическое) просветление.

Тема 11. Спектроскопия многоволнового смещения

Принцип и преимущества спектроскопии многоволнового смещения (СМС). Условия спектроскопических измерений. Спектроскопия когерентного антистоксового рассеяния света (КАРС). Стационарная амплитудная спектроскопия КАРС. Метод когерентной эллипсомерии. Другие схемы СМС. Резонансы, индуцированные упругими столкновениями.

Тема 12. Нестационарная спектроскопия

Когерентные резонансные эффекты: затухание свободной поляризации, квантовые биения, оптическая нутация, фотонное эхо, самоиндуцированная прозрачность. Обобщение на случай многофотонных резонансов. Когерентная нестационарная спектроскопия; измерение времен релаксации и матричных элементов. Некогерентная нестационарная спектроскопия. Измерение времен релаксации энергии.

7. Объем дисциплины

НАЗВАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	Трудоемкость в зачетных единицах	объем учебной нагрузки в ак. часах				
		Общая трудоемкость	в том числе ауд. занятий			Самостоятельная работа студентов
			Общая аудиторная нагрузка	Лекций	Семинаров	
Нелинейная лазерная спектроскопия и диагностика естественных сред	2	72	34	17	17	38

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

Изучение курса «Нелинейная лазерная спектроскопия и диагностика естественных сред» включает в себя лекции, на которых рассматривается теоретическое содержание курса, обсуждение вопросов, обозначенных в темах дисциплины; самостоятельную работу, заключающуюся в подготовке к лекционным занятиям, выполнения домашних заданий. 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	Методы линейной спектроскопии	4	1		1	2	Собеседование, опрос
2	Формализм матрицы плотности	10	3	-	3	4	

3	Двухуровневая система	8	2	-	2	4	
4	Спектроскопия насыщения	4	1		1	2	
5	Влияние сильного поля на структуру спектра	4	1		1	2	
6	Многофотонные резонансные процессы	7	2		2	3	
7	Спектроскопия многофотонного возбуждения	7	2		2	3	
8	Двухфотонное поглощение	4	1		1	2	
9	Вынужденное комбинационное рассеяние	4	1		1	2	
10	Параметрические процессы в резонансных условиях	4	1		1	2	
11	Спектроскопия многоволнового смещения	4	1		1	4	
12	Нестационарная спектроскопия	8	1		1	4	
	Промежуточная аттестация	4				4	Экзамен в устной форме
ИТОГО:		72	17	-	17	38	

9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.

Текущий контроль по дисциплине «Нелинейная лазерная спектроскопия и диагностика естественных сред» 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 «Нелинейная лазерная спектроскопия и диагностика естественных сред» проводится в форме экзамена. 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	Средство контроля, организованное как короткий письменный ответ на поставленный	Перечень тем, изучаемых в

(в форме ответов на вопросы)	вопрос по тематике предыдущей или текущей лекции, рассчитанное на выяснение объема и качества знаний, усвоенных обучающимися по определенному разделу, теме, проблеме.	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 экзамену

11. Шкала оценивания.

Планируемые результаты обучения	Критерии оценивания результатов обучения			
	2	3	4	5
ЗНАТЬ: основные законы и направления современных научных исследований в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники ОПК-3.Б 3-6	Отсутствие знаний основных законов и направлений современных научных исследований в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники	В целом успешные, но не систематические знания основных законов и направлений современных научных исследований в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы знания основных законов и направлений современных научных исследований в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники	Успешные и систематические знания основных законов и направлений современных научных исследований в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники
УМЕТЬ: на основе фундаментальных знаний в области лазерной физики, нелинейной оптики и	Отсутствие умения на основе фундаментальных знаний в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники определять возможные	В целом успешное, но не систематическое умение на основе фундаментальных знаний в области	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение на основе фундаменталь	Успешное и систематическое умение на основе фундаментальных знаний в области лазерной физики,

фотоники определять возможные направления научных исследований ОПК-3.Б У-6	направления научных исследований	лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники определять возможные направления научных исследований	ных знаний в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники определять возможные направления научных исследований	нелинейной оптики и фотоники определять возможные направления научных исследований
ВЛАДЕТЬ: профессиональн ыми знаниями для анализа физической информации в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники ОПК-3.Б В-6	Отсутствии/фрагмент арное владение знаниями для анализа физической информа- ции в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники	В целом успешное, но не систематическ ое владение знаниями для анализа физической информации в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники	В целом успешн ое, но содержащее отдельные пробелы владение знаниями для анализа физической информации в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники	Успешное и систематическ ое владение знаниями для анализа физической информации в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники

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

Материалы текущего контроля успеваемости обучающихся:

Пример:

1. Напишите уравнения для элементов матрицы плотности
2. Напишите уравнения Блоха для ДС
3. Перечислите основные методы спектроскопии насыщения
4. Напишите эффективный гамильтониан взаимодействия для ДФП/ВКР
5. Напишите систему уравнений, описывающих распространение волн в условиях ДФП/ВКР
6. Опишите принципиальную схему получения сигнала фотонного эха

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

Материалы промежуточного контроля успеваемости обучающихся в форме экзамена:

1. Роль спектроскопии в науке. Основные методы линейной спектроскопии, их ограничения и трудности.
2. Лазеры в линейной спектроскопии. Методы линейной спектроскопии, свободной от

доплеровского уширения.

3. Метод матрицы плотности. Уравнение фон Неймана. Усреднение по состояниям термостата. Интегродифференциальные уравнения для матрицы плотности.
4. Немарковость релаксации матрицы плотности. Зависимость релаксации от падающих полей. Кинетические дифференциальные уравнения для матрицы плотности и условия их применимости.
5. Двухуровневое приближение в теории резонансных взаимодействий. Уравнения для ДС. Времена релаксации. Векторное представление ДС. Вектор Блоха.
6. Динамика ДС в поле коротких импульсов. Осцилляции Раби.
7. Двухуровневая система в поле квазимонохроматического излучения. Вероятности переходов. Эффект насыщения. Решения Торри для переходных процессов. Волновые уравнения для резонансных полей.
8. Спектроскопия насыщения. Поляризация среды при неоднородном уширении. Насыщение в неоднородно уширенной линии. Дырки Беннета. Провал Лэмба. Принцип спектроскопии насыщения. Модель выжигания дырок.
9. Влияние сильного поля на структуру спектра. Уравнения для двухуровневой системы в поле двух волн. Установившееся решение. Поляризация ансамбля ДС. Спектр поглощения слабой волны в присутствии сильной. Интерпретация спектров.
10. Модели “голого” и “одетого” атомов.
11. Виды многофотонных процессов. Метод усреднения применительно к уравнениям для матрицы плотности. Уравнения для обобщенной двухуровневой системы. Гамильтониан усредненного движения. Динамический эффект Штарка. Поляризация среды при наличии многофотонных резонансов. Уравнения для амплитуд полей.
12. Вероятности многофотонных переходов. Правила отбора. Методы многофотонной спектроскопии: фотолюминесцентный, фотоионизационный и др. Многофотонная спектроскопия, свободная от доплеровского уширения.
13. Двухволновая модель ВКР. Система уравнений для ВКР. Усиление и преломление стоксовой волны при ВКР. Спектроскопия ВКР-усиления.
14. Уравнения распространения полей в двухфотонно поглощающих средах. Квазистационарное приближение. Эффект насыщения. Коэффициент поглощения и показатель преломления. Поляризационные эффекты. Методы спектроскопии двухфотонного поглощения.
15. Виды параметрических резонансных процессов. Сопутствующие эффекты. Поляризация вещества. Учет нерезонансной восприимчивости. Многоканальное возбуждение. Интерференционные эффекты. Интерференционное (параметрическое) просветление.
16. Принцип и преимущества спектроскопии многоволнового смешения. Условия спектроскопических измерений. Спектроскопия когерентного антистоксового рассеяния света (КАРС).
17. Стационарная амплитудная спектроскопия КАРС. Метод когерентной эллипсометрии. Другие схемы СМС. Резонансы, индуцированные упругими столкновениями.
18. Когерентные резонансные эффекты: затухание свободной поляризации, квантовые биения, оптическая нутация, самоиндуцированная прозрачность. Обобщение на случай многофотонных резонансов.
19. Первичное и стимулированное фотонное эхо.
20. Когерентная нестационарная спектроскопия; измерение времен релаксации и матричных элементов.

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

Основная литература.

1. П.А. Апанасевич, Основы теории взаимодействия света с веществом (Наука и техника, Минск, 1977).
2. Н. Бломберген, Нелинейная спектроскопия (Мир, Москва, 1979).
3. В. Демтрёдер, Лазерная спектроскопия (Наука, Москва, 1985).
4. В.С. Летохов, В.П. Чеботаев, Нелинейная лазерная спектроскопия сверхвысокого разрешения (Наука, Москва, 1990).
5. И.Р. Шен, Принципы нелинейной оптики (Наука, Москва, 1989).

Дополнительная литература.

1. С.А. Ахманов, Н.И. Коротеев, Методы нелинейной оптики в спектроскопии рассеяния света (Наука, Москва, 1981).
2. Л. Аллен, Дж. Эберли, Оптический резонанс и двухуровневые атомы (Мир, Москва, 1978).
3. Э.А. Маныкин, В.В. Самарцев, Оптическая эхо-спектроскопия (Наука, Москва, 1984).
4. С. Стенхольм, Основы лазерной спектроскопии (Мир, Москва, 1987).

Интернет-ресурсы.

Материально-техническое обеспечение

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

Для лекционной части курса требуются аудитория, оснащенная учебной доской.