

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:

ЛАЗЕРНЫЕ ПУЧКИ И ИМПУЛЬСЫ В НЕЛИНЕЙНЫХ СРЕДАХ

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 Карговский Алексей Владимирович, кафедра общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ

Аннотация к рабочей программе дисциплины
«Лазерные пучки и импульсы в нелинейных средах»

Курс представляет собой систематическое изложение физических основ нелинейной оптики и состоит из двух основных блоков. Первый из них составляют вопросы теории взаимодействия с веществом электромагнитного (светового) излучения, интенсивность которого достаточна для проявления нелинейности отклика среды, но является "неразрушающей", т.е. излучение еще не вызывает разрушения структуры вещества. Второй блок — это волновая нелинейная оптика. Здесь рассматриваются такие, ставшие уже традиционными, вопросы как взаимодействие волн в процессах генерации гармоник, параметрического усиления и генерации, при вынужденном рассеянии и двухфотонном поглощении. Значительное место уделено эффектам самовоздействия световых пучков и импульсов.

Дисциплина читается на 2м году обучения в 1 ом семестре

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 «Лазерные пучки и импульсы в нелинейных средах» обучающийся кроме знаний предмета получает навыки применения ранее полученных знаний для решения новых научных и практических задач.

Дисциплина относится к вариативной части программы и читается в 3 семестре.

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)	Знать основные законы и направления современных научных исследований в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники. Уметь на основе фундаментальных знаний в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники, определять возможные направления научных исследований. Владеть необходимой информацией из современных отечественных и зарубежных источников по тематике избранного направления исследования в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники.
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)	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. Уметь используя знания в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники проводить научные исследования. Владеть навыками планирования научного исследования, анализа получаемых результатов, обобщения, оформления и публичного представления полученных результатов.

<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. Электромагнитные волны в среде

Уравнения Максвелла-Лоренца для точных значений электрического и магнитного поля. Учет атомной структуры вещества. Мультипольное разложение. Усреднение уравнений Максвелла-Лоренца. Формула для электрической поляризации среды. Связь между характеристиками среды и векторами поля; феноменологический и микроструктурный подходы.

Тема 2. Феноменологическая теория оптических восприимчивостей

Функциональная связь между поляризацией вещества и полем. Разложение функционала в ряд по степеням поля. Линейные и нелинейные функции отклика среды. Тензорный характер функций отклика. Временная и пространственная нелокальность отклика. Тензоры оптических восприимчивостей. Тензор линейной восприимчивости. Нелинейные восприимчивости второго и третьего порядков. Основные нелинейные оптические эффекты. Свойства тензоров оптических восприимчивостей. Внутренняя симметрия. Пространственно-частотные перестановочные соотношения для тензоров нелинейных восприимчивостей. Соотношения Клейнмана. Внешняя симметрия. Влияние симметрии оптических сред на свойства оптических восприимчивостей.

Тема 3. Волновые уравнения нелинейной оптики

Метод связанных волн. Условия на границе раздела сред. Приближение медленно меняющихся амплитуд. Плоские волны в первом приближении теории дисперсии. Волновые пакеты в изотропной среде; второе приближение теории дисперсии. Монохроматические световые пучки в нелинейной изотропной среде. Импульсные световые пучки в нелинейной изотропной среде.

Тема 4. Квантовая теория поляризации вещества

Чистые и смешанные состояния квантовых систем. Уравнение фон Неймана для матрицы плотности. Учет взаимодействия квантовой системы с окружающей средой («термостатом») и полем излучения. Матрица плотности, усредненная по состояниям «термостата». Смысл

диагональных и недиагональных элементов матрицы плотности в энергетическом представлении. Упругие и неупругие процессы релаксации. Дифференциальные уравнения для усредненной матрицы плотности. Решение уравнений методом возмущений. Действие квазимонохроматических полей. Однофотонные и многофотонные квантовые переходы. Тензоры оптических восприимчивостей в электродипольном приближении. Трактовка нелинейного отклика среды в терминах многофотонных процессов. Время «памяти» в среде. Резонансные свойства восприимчивостей. Соотношения перестановочной симметрии для тензоров оптических восприимчивостей. Сходимость ряда разложения поляризации по степеням поля.

Тема 5. Ориентационная нелинейность

Ориентация молекул в монохроматическом поле. Ориентация молекул в немонахроматическом поле. Ориентационная добавка к показателю преломления. Вынужденное рассеяние в крыле линии Рэлея (ВРКЛР). Стоксовы и антистоксовы компоненты при ВРКЛР. Спонтанное рассеяние в крыле линии Рэлея.

Тема 6. Электрострикционная нелинейность

Физика электрострикции. Зависимость поляризации вещества от плотности и температуры. Генерация акустических волн в световых полях. Уравнения взаимодействия акустических и световых волн и их простейшие решения. Вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ). Спонтанное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна.

Тема 7. Другие виды оптической нелинейности

Температурная нелинейность. Вынужденное температурное рассеяние I и II рода. Концентрационное рассеяние. Фоторефракция. Лоренцева нелинейность.

Тема 8. Параметрические процессы

Трехфотонные (трехволновые) взаимодействия. Основные уравнения. Характерные длины взаимодействия волн. Фазовый синхронизм. Интегралы сохранения. Генерация второй гармоники. Сложение и вычитание частот. Распадная неустойчивость волн. Реализация фазового синхронизма в двулучепреломляющих и периодических средах. Четырехфотонные (четырёхволновые) параметрические процессы. Генерация третьей гармоники и смещение частот. Обращение волнового фронта (ОВФ) при четырехволновых взаимодействиях.

Тема 9. Многофотонные процессы с возбуждением среды

Двухфотонное поглощение. Спонтанные и вынужденные рассеяния. Стоксовы и антистоксовы компоненты. Вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР). ВКР на молекулярных колебаниях. Модель Плачека. Двухволновая модель ВКР. Взаимодействие стоксовых и антистоксовых компонент. Компоненты высших порядков. ОВФ при вынужденных рассеяниях. Коэффициенты усиления обращенной и некоррелированной компонент. Некоторые применения ОВФ.

Тема 10. Взаимодействие модулированных световых волн

Эффекты группового запаздывания при временной модуляции волн. Апертурные эффекты. Пространственно-временная аналогия.

Тема 11. Самовоздействие и дифракция в нелинейной среде

Уравнения для световых пучков в среде с нелинейным показателем преломления. Автомодельное решение в приосевом приближении. Самофокусировка и самодефокусировка волновых пучков. «Нити» самофокусировки и «бегущие» фокусы. Волноводное распространение (самоканалирование); пространственные солитоны.

Тема 12. Самовоздействие волновых пакетов

Эффект самомодуляции импульсов электромагнитного излучения. Сжатие импульсов.

Эволюция импульсов в нелинейной среде. Нелинейное уравнение Шредингера. Самосжатие импульсов. Солитоны огибающей.

7. Объем дисциплины

НАЗВАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	Трудоемкость в зачетных	объем учебной нагрузки в ак. часах				
		Общая трудоемкость	в том числе ауд. занятий			Самостоятельная работа студентов
			Общая аудиторная нагрузка	Лекций	Семинаров	
Лазерные пучки и импульсы в нелинейных средах	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 «Лазерные пучки и импульсы в нелинейных средах» 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, рассматриваемые на лекциях и изучаемые самостоятельно, закрепляются на семинарских занятиях.

№ 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	Электромагнитные волны в среде	4	1		1	2	Собеседование, опрос
2	Феноменологическая теория оптических восприимчивостей	8	2	-	2	4	

3	Волновые уравнения нелинейной оптики	4	1	-	1	2	
4	Квантовая теория поляризации вещества	10	3		3	4	
5	Ориентационная нелинейность	4	1		1	2	
6	Электрострикционная нелинейность	4	1		1	2	
7	Другие виды оптической нелинейности	4	1		1	2	
8	Параметрические процессы	8	2		2	4	
9	Многофотонные процессы с возбуждением среды	8	3		3	4	
10	Взаимодействие модулированных световых волн	4	1		1	2	
11	Самовоздействие и дифракция в нелинейной среде	6	2		2	2	
12	Самовоздействие волновых пакетов	4	1		1	2	
	Промежуточная аттестация	4				4	Экзамен в устной форме
ИТОГО:		72	18	-	18	36	

9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.

Текущий контроль по дисциплине «Лазерные пучки и импульсы в нелинейных средах» 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 «Лазерные пучки и импульсы в нелинейных средах» 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 (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 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 фотоники определять возможные направления	Отсутствие умения на основе фундаментальных знаний в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники определять возможные направления научных исследований	В целом успешное, но не систематическое умение на основе фундаментальных знаний в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение на основе фундаментальных знаний в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники	Успешное и систематическое умение на основе фундаментальных знаний в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники определять возможные направления

научных исследований ОПК-3.Б У-6		определять возможные направления научных исследований	фотоники определять возможные направления научных исследований	направления научных исследований
ВЛАДЕТЬ: профессиональными знаниями для анализа физической информации в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники ОПК-3.Б В-6	Отсутствие/фрагментарное владение знаниями для анализа физической информации в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники	В целом успешное, но не систематическое владение знаниями для анализа физической информации в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы владение знаниями для анализа физической информации в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники	Успешное и систематическое 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. Запишите соотношения Клейнмана. При каких условиях они выполняются?
2. Запишите уравнения для связанных волн в первом приближении теории дисперсии.
3. Какие физические механизмы ответственны за вынужденное температурное рассеяние?
4. Запишите соотношения Мэнли-Роу. Каков их физический смысл?
5. Опишите схему ОВФ при вынужденном рассеянии.

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

Материалы промежуточного контроля успеваемости обучающихся в форме экзамена:

1. Уравнения Максвелла-Лоренца для точных значений электрического и магнитного поля. Учет атомной структуры вещества. Мультипольное разложение. Усреднение уравнений Максвелла-Лоренца.
2. Функциональная связь между поляризацией вещества и полем. Разложение функционала в ряд по степеням поля. Линейные и нелинейные функции отклика среды. Тензорный характер функций отклика. Временная и пространственная нелокальность отклика. Тензоры оптических восприимчивостей.
3. Свойства тензоров оптических восприимчивостей. Внутренняя симметрия. Пространственно-частотные перестановочные соотношения для тензоров нелинейных

восприимчивостей. Соотношения Клейнмана. Внешняя симметрия. Влияние симметрии оптических сред на свойства оптических восприимчивостей.

4. Метод связанных волн. Условия на границе раздела сред. Приближение медленно меняющихся амплитуд. Плоские волны в первом приближении теории дисперсии.
5. Волновые пакеты в изотропной среде; второе приближение теории дисперсии. Монохроматические световые пучки в нелинейной изотропной среде. Импульсные световые пучки в нелинейной изотропной среде.
6. Уравнение фон Неймана для матрицы плотности. Матрица плотности, усредненная по состояниям «термостата». Смысл диагональных и недиагональных элементов матрицы плотности в энергетическом представлении. Упругие и неупругие процессы релаксации. Дифференциальные уравнения для усредненной матрицы плотности.
7. Однофотонные и многофотонные квантовые переходы. Тензоры оптических восприимчивостей в электродипольном приближении. Трактовка нелинейного отклика среды в терминах многофотонных процессов. Время «памяти» в среде. Резонансные свойства восприимчивостей.
8. Ориентация молекул в монохроматическом поле. Ориентация молекул в немонахроматическом поле. Ориентационная добавка к показателю преломления. Вынужденное и спонтанное рассеяние в крыле линии Рэлея.
9. Электрострикционная нелинейность. Генерация акустических волн в световых полях. Уравнения взаимодействия акустических и световых волн и их простейшие решения. Вынужденное и спонтанное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна.
10. Температурная нелинейность. Вынужденное температурное рассеяние I и II рода. Концентрационное рассеяние. Фоторефракция. Лоренцева нелинейность.
11. Трехфотонные (трехволновые) взаимодействия. Фазовый синхронизм. Интегралы сохранения.
12. Генерация второй гармоники. Сложение и вычитание частот.
13. Распадная неустойчивость волн. Реализация фазового синхронизма в двулучепреломляющих и периодических средах. Четырехфотонные (четырёхволновые) параметрические процессы. Генерация третьей гармоники и смешение частот. Обращение волнового фронта (ОВФ) при четырехволновых взаимодействиях.
14. Двухфотонное поглощение. Спонтанные и вынужденные рассеяния. Стоксовы и антистоксовы компоненты. Вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР). ВКР на молекулярных колебаниях. Модель Плачека.
15. Двухволновая модель ВКР. Взаимодействие стоксовых и антистоксовых компонент. Компоненты высших порядков.
16. ОВФ при вынужденных рассеяниях. Коэффициенты усиления обращенной и некоррелированной компонент. Некоторые применения ОВФ.
17. Эффекты группового запаздывания при временной модуляции волн. Апертурные эффекты. Пространственно-временная аналогия.
18. Уравнения для световых пучков в среде с нелинейным показателем преломления. Автомодельное решение в приосевом приближении. Самофокусировка и самодефокусировка волновых пучков. «Нити» самофокусировки и «бегущие» фокусы.
19. Волноводное распространение (самоканалирование); пространственные солитоны.
20. Эффект самомодуляции импульсов электромагнитного излучения. Сжатие импульсов. Эволюция импульсов в нелинейной среде. Нелинейное уравнение Шредингера. Самосжатие импульсов. Солитоны огибающей.

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. С.А. Ахманов, Р.В. Хохлов, Проблемы нелинейной оптики (ВИНИТИ, Москва, 1964).
3. Н. Бломберген, Нелинейная оптика (Мир, Москва, 1966).
4. М.Б. Виноградова, О.Б. Руденко, А.П. Сухоруков, Теория волн (Наука, Москва, 1991).
5. И.Р. Шен, Принципы нелинейной оптики (Наука, Москва, 1989).

Дополнительная литература.

1. В.Г. Дмитриев, Л.В. Тарасов, Прикладная нелинейная оптика (Физматлит, Москва, 2004).
2. Б.Я. Зельдович, Н.Ф. Пилипецкий, В.В. Шкунов, Обращение волнового фронта (Наука, Москва, 1985).
3. С. Келих, Молекулярная нелинейная оптика (Наука, Москва, 1981).
4. Д.Н. Клышко, Физические основы квантовой электроники (Наука, Москва, 1986).

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.