


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:**

Распространение лазерного излучения в газах и конденсированных средах

---

**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 О. Г. Косарева

к.ф.-м.н., старший научный сотрудник физического факультета МГУ Н. А. Панов

младший научный сотрудник физического факультета МГУ Д. Е. Шипило

## Аннотация к рабочей программе дисциплины

### «Распространение лазерного излучения в газах и конденсированных средах»

В течение последних двадцати лет получен огромный массив экспериментальных данных в области фемто- и аттосекундной лазерной физики экстремальных световых полей. Сверхкороткая длительность и сверхширокий частотно-угловой состав излучения потребовали новых теоретических подходов к описанию проблем распространения лазерного излучения в газах и конденсированных средах. Учет эффектов пространственно-временной трансформации поля с распространением лазерного импульса позволяет проводить корректное сравнение результатов теоретических/численных исследований с экспериментальными данными.

Курс состоит из двух основных частей. Первая из них посвящена однонаправленным уравнениям распространения — нового математического аппарата для описания сверхширокого спектрального (от терагерцового до ультрафиолетового) и углового (до  $90^\circ$  относительно оси пучка) состава излучения. Однонаправленные уравнения допускают учет продольной компоненты электромагнитного поля, всегда присутствующей в ограниченных пучках и являющейся важной для задач ускорения частиц. В рамках единого подхода получен каскад параксиальных уравнений для поля и его медленно меняющейся амплитуды, рассмотрены и проанализированы их аналитические решения. Представлено описание численных подходов к интегрированию уравнений распространения.

Во второй части курса представлено описание нелинейного отклика среды на высокоинтенсивное излучение в прозрачной газовой и конденсированной среде. Получены выражения для поляризации связанных электронов и фототока электронов, освободившихся вследствие ионизации среды в сильном поле. Рассмотрены особенности нелинейного распространения инфракрасного излучения в молекулярных газах, в том числе с учетом резонансного отклика. Для конденсированных сред и газов высокого давления дано описание электронной лавины, развивающейся на фемтосекундных временах.

Кроме того, в курсе рассмотрены вопросы измерения длительности сверхкоротких импульсов и применения высокоинтенсивного ультракороткого лазерного излучения.

### 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 «Распространение лазерного излучения в газах и конденсированных средах» реализуется на 2-ом курсе в 3-ем семестре и относится к вариативной части программы обучения.

В результате освоения дисциплины «Распространение лазерного излучения в газах и конденсированных средах» 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)
ОПК-3.Б	<b>З-6 Знать:</b> методы теоретического описания распространения излучения экстремальной интенсивности в газовых и конденсированных средах <b>У-6 Уметь:</b> применять методы теоретического описания распространения фемтосекундного излучения для решения конкретных задач физики экстремальных полей <b>В-1 Владеть:</b> методами численного моделирования распространения излучения экстремальной интенсивности

4. **Форма обучения:** очная

5. **Язык обучения:** русский

6. **Содержание дисциплины:**

*Тема 1. Особенности распространения ультракоротких импульсов высокой интенсивности в объемных средах*

Характерные параметры фемтосекундных лазерных импульсов. Дифракция и пространственно-временная дефокусировка импульса с широким частотным спектром. Дисперсия групповой скорости, высшие порядки дисперсии. Зависимость действительной и

мнимой частей показателя преломления от частоты в окрестности линий поглощения. Нестационарная самофокусировка коллимированного и сфокусированного излучения. Фазовая самомодуляция. Волновая нестационарность (самоукручение импульса). Самосжатие импульса. Генерация спектрального континуума. Запаздывающий отклик керровской нелинейности при возбуждении вращательных переходов двухатомных молекул. Фотоионизация. Насыщение интенсивности. Дефокусировка в самонаведенной лазерной плазме. Потери энергии импульса вследствие генерации свободных электронов и столкновений электронов с нейтралами.

*Тема 2. Экспериментальные методы регистрации ультракоротких лазерных импульсов*

Измерения длительности фемтосекундных импульсов высокой интенсивности методами SHG-FROG (Second Harmonic Generation-Frequency Resolved Optical Gating), SPIDER (Spectral Phase Interferometry for Direct Electric field Reconstruction). Измерения спектрального континуума интегрально по пучку. Измерение частотно-угловых спектров фемтосекундного импульса изображающим спектрометром. Измерение выхода терагерцового излучения из плазмы фокальной перетяжки интегрально и с разрешением по частоте и углу.

*Тема 3. Теоретическое описание и численное моделирование распространения фемтосекундного лазерного излучения в объемной среде*

Волновое уравнение и уравнение Гельмгольца. Линейная и нелинейная поляризация. Однонаправленное уравнение распространения лазерного излучения. Непараксиальные эффекты. Однонаправленное уравнение Максвелла. Метод медленно меняющихся амплитуд. Оператор волновой нестационарности. Параболическое уравнение дифракции и дисперсии второго порядка. Пространственная и временная фокусировка. Нормальная и аномальная дисперсия.

*Тема 4. Жесткая фокусировка фемтосекундных лазерных импульсов*

Дифракционный интеграл Кирхгофа-Гельмгольца и его обобщение в форме векторных дифракционных интегралов. Продольное электромагнитное поле в ограниченных пучках. Векторные уравнения распространения как следствие уравнений Максвелла. Проблема начальных условий для непараксиальных векторных уравнений. Непараксиальные начальные условия для непараксиальных векторных уравнений распространения.

*Тема 5. Фемтосекундная нелинейная оптика газовых сред*

Классическое описание линейного отклика связанного и свободного электрона на внешнее поле. Формула Коши для дисперсии прозрачной среды. Теория Друде-Лоренца. Квантовомеханическое описание атомного отклика. Распространение лазерного излучения в среде с резонансами. Факторизация нелинейности на отклик свободных и связанных электронов. Нелинейная поляризация. Ионизация и фототок свободных электронов. Модели ионизации. Полевая ионизация. Параметр Келдыша. Вращательная нелинейность ансамбля двухатомных молекул.

*Тема 6. Распространение фемтосекундного лазерного импульса в конденсированной среде*

Коллективные эффекты на фемтосекундных временах. Лавинная ионизация в конденсированных средах и газах высокого давления. Особенности ионизации в средах с центрами окраски и полупроводниках. Модель осциллятора с затуханием для описания запаздывающей кубической нелинейности.

*Тема 7. Применение высокоинтенсивного ультракороткого лазерного излучения*

Острогофокусированное лазерное излучение как лазерный скальпель. Широкоапертурная оптика для получения высокоэнергетических пучков протонов и электронов из расположенной в вакуумной камере мишени. Оптимизация энергии импульса и числовой

апертуры для записи волноводов в прозрачных твердых диэлектриках. Генерация терагерцового излучения из микроплазменного источника.

## 7. Объем дисциплины

НАЗВАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	Трудоемкость в зачетных единицах	объем учебной нагрузки в ак. часах					Самостоятельная работа студентов
		Общая трудоемкость	в том числе			Самостоятельная работа студентов	
			ауд. занятий				
		Общая	ауд.	итоговая	Лекций	Семинаров	
Распространение лазерного излучения в газах и конденсированных средах	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 «Распространение лазерного излучения в газах и конденсированных 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. 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	Особенности распространения ультракоротких импульсов	4	1		1	2	Собеседование,

	высокой интенсивности в объемных средах						опрос
2	Экспериментальные методы регистрации ультракоротких лазерных импульсов	6	1	-	1	4	
3	Теоретическое описание и численное моделирование распространения фемтосекундного лазерного излучения в объемной среде	20	5	-	5	10	
4	Жесткая фокусировка фемтосекундных лазерных импульсов	10	3		3	4	
5	Фемтосекундная нелинейная оптика газовых сред	18	5		5	8	
6	Распространение фемтосекундного лазерного импульса в конденсированной среде	6	2		2	2	
7	Применение высокоинтенсивного ультракороткого лазерного излучения	4	1		1	4	
	Промежуточная аттестация	4				4	Экзамен в устной форме
<b>ИТОГО:</b>		<b>72</b>	<b>17</b>	<b>-</b>	<b>17</b>	<b>38</b>	

#### 9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.

Текущий контроль по дисциплине «Распространение лазерного излучения в газах и конденсированных 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 «Распространение лазерного излучения в газах и конденсированных средах» 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
<b>Оценочные средства текущего контроля</b>		
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
<b>Оценочные средства промежуточной аттестации</b>		
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
<b>ЗНАТЬ:</b> методы теоретического описания распространения излучения экстремальной интенсивности в газовых и конденсированных средах ОПК-3.Б 3-6	Отсутствие знаний методов теоретического описания распространения излучения экстремальной интенсивности в газовых и конденсированных средах	В целом успешные, но не систематическое знания методов теоретического описания распространения излучения экстремальной интенсивности в газовых и конденсированных средах	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы знания методов теоретического описания распространения излучения экстремальной интенсивности в газовых и конденсированных средах	Успешные и систематические знания методов теоретического описания распространения излучения экстремальной интенсивности в газовых и конденсированных средах
<b>УМЕТЬ:</b> применять методы теоретического описания распространения фемтосекундного	Отсутствие умения применять методы теоретического описания распространения фемтосекундного	В целом успешное, но не систематическое умение применять	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение	Успешное и систематическое умение применять методы теоретического



ия фемтосекундн ого излучения для решения конкретных задач физики экстремальных полей ОПК-3.Б У-6	излучения для решения конкретных задач физики экстремальных полей	методы теоретическог о описания распространен ия фемтосекундн ого излучения для решения конкретных задач физики экстремальных полей	применять методы теоретическог о описания распространен ия фемтосекундн ого излучения для решения конкретных задач физики экстремальных полей	о описания распространен ия фемтосекундн ого излучения для решения конкретных задач физики экстремальных полей
ВЛАДЕТЬ: методами численного моделирования распространен ия излучения экстремальной интенсивности ОПК-3.Б В-6	Отсутствие/фрагмент арное владение методами численного моделирования распространения излучения экстремальной интенсивности	В целом успешное, но не систематическ ое владение методами численного моделировани я распространен ия излучения экстремальной интенсивности	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы владение методами численного моделировани я распространен ия излучения экстремальной интенсивности	Успешное и систематическ ое владение методами численного моделировани я распространен ия излучения экстремальной интенсивности

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

### Материалы текущего контроля успеваемости обучающихся:

#### Пример:

1. Нелинейная поляризация изотропной среды  $\vec{P}(t) = \chi^{(3)} |\vec{E}(t)|^2 \vec{E}(t)$ .
  - a. Доказать, что циркулярно поляризованное излучение не генерирует третью гармонику.
  - b. Выразить поляризацию на частоте третьей гармоники при воздействии циркулярно поляризованными первой и второй гармоникой.
2. Показатель преломления воздуха может быть описан формулой Коши  $n(\omega) = 1 + 2 \times 10^{-4} + 5 \times 10^{-37} \text{ c}^2 \times \omega^2$ . Для импульса на длине волны  $\lambda = 2 \text{ мкм}$  с длительностью  $\tau = 100 \text{ фс}$  оцените
  - a. Длину фазового синхронизма в воздухе для генерации третьей гармоники.
  - b. Длину группового синхронизма в воздухе с импульсом второй гармоники на длине волны  $\lambda/2$  с длительностью  $\tau$ .
3. Фототок свободных электронов в поле  $E(t)$  может быть определен из скоростного уравнения  $\frac{dJ}{dt} = \frac{e^2}{m} N(t) E(t) - \nu J$ , где  $e$ ,  $m$ ,  $N$  — заряд, масса и концентрация свободных электронов,  $\nu$  — частота столкновений электронов с тяжелыми частицами среды.

Показать, что для постоянной концентрации  $N$  такая модель эквивалентна эффективному показателю преломления в плазме по модели Друде-Лоренца.

4. Оценить интенсивность на мишени в вакууме при фокусировке гауссова лазерного импульса с энергией  $W = 1$  мДж, длительностью  $\tau = 50$  фс и числовой апертуре  $NA = 0.1$ .
5. В спектральном пространстве однонаправленное уравнение Максвелла имеет вид

$$\frac{\partial \hat{E}}{\partial z} = -i \left[ k(\omega) + \frac{\Delta_{\perp}}{2k(\omega)} \right] \hat{E}(\omega, r, z) - \frac{2\pi}{c} [i\hat{P}(\omega, r, z) + \hat{J}(\omega, r, z)].$$

- a. Показать, что данное уравнение сохраняет энергию импульса  $2\pi \int |E|^2(t, r, z) dt r dr$ .
- b. Получить данное уравнение во временном представлении  $(t, r, z)$  в предположении  $k(\omega) = (1 + A + B\omega^2) \omega/c$ ,  $P(t) = \chi^{(3)} E^3(t)$ ,  $J = 0$ .

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

#### *Материалы промежуточного контроля успеваемости обучающихся в форме экзамена:*

1. Непрерывное и дискретное преобразование Фурье и его свойства. Двумерное преобразование Фурье и преобразование Ханкеля, их свойства.
2. Волновое уравнение и уравнение Гельмгольца. Линейная и нелинейная поляризация. Показатель преломления.
3. Однонаправленное уравнение распространения лазерного излучения. Учет непараксиальных эффектов. Основные задачи для однонаправленного уравнения распространения.
4. Однонаправленное уравнение Максвелла как параксиальное приближение однонаправленного уравнения распространения. Основные задачи для однонаправленного уравнения Максвелла. Преимущества и недостатки с точки зрения моделирования нелинейных задач распространения.
5. Метод медленно меняющихся амплитуд. Вывод уравнения для амплитуды волнового пакета из однонаправленного уравнения Максвелла. Оператор волновой нестационарности. Преимущества и недостатки с точки зрения моделирования нелинейных задач распространения.
6. Метод медленно меняющихся амплитуд. Вывод уравнения для амплитуды волнового пакета из волнового уравнения. Оператор волновой нестационарности. Преимущества и недостатки с точки зрения моделирования нелинейных задач распространения.
7. Параболическое уравнение дифракции. Уравнение дисперсии второго порядка. Их аналитические решения. Пространственная и временная фокусировка. Нормальная и аномальная дисперсия. Характерные длины для дифракционных и дисперсионных эффектов.
8. Дифракция Эрмит-Гауссовых пучков. Дифракция Лагерр-Гауссовых пучков. Параметр качества пучка  $M^2$ .
9. Дифракционный интеграл Кирхгофа-Гельмгольца и его обобщение в форме векторных дифракционных интегралов. Продольное электромагнитное поле в ограниченных пучках.
10. Векторные уравнения распространения для вектор-потенциала и потенциала Герца как следствие уравнений Максвелла. Продольное поле электромагнитное поле в ограниченных пучках.

11. Проблема начальных условий для непараксиальных векторных уравнений. Критерий применимости приближения аномальной дифракции при описании фокусирующего действия параболического зеркала и его физическая интерпретация.
12. Непараксиальные начальные условия для непараксиальных векторных уравнений распространения. Вывод и общие принципы построения для произвольной отражающей поверхности. Скалярное приближение непараксиальных начальных условий.
13. Непараксиальные начальные условия в случае высокоапертурной фокусировки параболическим зеркалом. Скалярное приближение непараксиальных начальных условий для параболической фокусировки.
14. Непараксиальные начальные условия в случае высокоапертурной фокусировки коническим зеркалом. Скалярное приближение непараксиальных начальных условий для конической фокусировки.
15. Классическое описание линейного отклика связанного и свободного электрона на внешнее поле. Формула Коши для дисперсии прозрачной среды. Теория Друде-Лоренца.
16. Квантовомеханическое описание атомного отклика. Разложение отклика по степеням поля в теории возмущений. Резонансный характер диэлектрической восприимчивости атома.
17. Распространение лазерного излучения в среде с резонансами. Соотношения Крамерса-Кронига. Аномальная дисперсия в коротковолновой окрестности резонанса. Учет резонансов в уравнениях распространения.
18. Факторизация нелинейности на отклик свободных и связанных электронов. Нелинейная поляризация. Ионизация и фототок свободных электронов.
19. Модели ионизации. Полевая ионизация. Параметр Келдыша. Асимптотики полевой ионизации.
20. Распространение фемтосекундного лазерного излучения в конденсированных средах. Лавинная ионизация.
21. Распространение фемтосекундного лазерного излучения в конденсированных средах. Особенности ионизации в средах с центрами окраски и полупроводниках.
22. Запаздывающая нелинейность. Модель осциллятора с затуханием для описания запаздывающей кубической нелинейности. Методы численного моделирования явления.
23. Запаздывающая нелинейность в молекулярных средах. Вращательная нелинейность ансамбля двухатомных молекул.

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

##### Основная литература.

1. Ахманов С. А., Никитин С. Ю. Физическая оптика. МГУ. – 1998.
2. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. – Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – С. 592.
3. Виноградова М. Б., Руденко О. В., Сухоруков А. П. Теория волн. Наука – 1990.
4. Шен И. Р. Принципы нелинейной оптики. – Рипол Классик, 1989.
5. Косарева О. Г. Фурье-оптика пучков и сверхкоротких импульсов. Отдел оперативной печати Физического факультета МГУ — 2017.
6. Kolesik, M., & Moloney, J. V. (2013). Modeling and simulation techniques in extreme nonlinear optics of gaseous and condensed media. Reports on Progress in Physics, 77(1), 016401.

7. Couairon, A., Brambilla, E., Corti, T., Majus, D., Ramírez-Góngora, O. D. J., & Kolesik, M. (2011). Practitioner's guide to laser pulse propagation models and simulation. *The European Physical Journal Special Topics*, 199(1), 5-76.
8. Попов, В. С. (2004). Туннельная и многофотонная ионизация атомов и ионов в сильном лазерном поле (теория Келдыша). *Успехи физических наук*, 174(9), 921-951.
9. Varga, P., & Török, P. (2000). Focusing of electromagnetic waves by paraboloid mirrors. I. Theory. *JOSA A*, 17(11), 2081-2089.
10. Shipilo, D. E., Nikolaeva, I. A., Fedorov, V. Y., Tzortzakis, S., Couairon, A., Panov, N. A., & Kosareva, O. G. (2019). Tight focusing of electromagnetic fields by large-aperture mirrors. *Physical Review E*, 100(3), 033316.
11. Borodin, A. V., Panov, N. A., Kosareva, O. G., Andreeva, V. A., Esaulkov, M. N., Makarov, V. A., ... & Zhang, X. C. (2013). Transformation of terahertz spectra emitted from dual-frequency femtosecond pulse interaction in gases. *Optics letters*, 38(11), 1906-1908.
12. Panov, N. A., Shipilo, D. E., Andreeva, V. A., Kosareva, O. G., Saletsky, A. M., Xu, H., & Polynkin, P. (2016). Supercontinuum of a 3.9- $\mu\text{m}$  filament in air: Formation of a two-octave plateau and nonlinearly enhanced linear absorption. *Physical Review A*, 94(4), 041801.

#### Дополнительная литература.

1. Boyd R. W. *Nonlinear optics*. – Academic press, 2020.
2. Husakou, A. V., & Herrmann, J. (2001). Supercontinuum generation of higher-order solitons by fission in photonic crystal fibers. *Physical Review Letters*, 87(20), 203901.
3. Brabec, T., & Krausz, F. (1997). Nonlinear optical pulse propagation in the single-cycle regime. *Physical Review Letters*, 78(17), 3282.
4. Бочкарев, С. Г., & Быченков, В. Ю. (2007). Ускорение электронов при острой фокусировке фемтосекундного лазерного излучения. *Квантовая электроника*, 37(3), 273-284.
5. Couairon, A., Kosareva, O. G., Panov, N. A., Shipilo, D. E., Andreeva, V. A., Jukna, V., & Nesa, F. (2015). Propagation equation for tight-focusing by a parabolic mirror. *Optics express*, 23(24), 31240-31252.
6. Mokrousova, D. V., Savinov, S. A., Seleznev, L. V., Rizaev, G. E., Koribut, A. V., Mityagin, Y. A., ... & Shkurinov, A. P. (2020). Tracing Air-Breakdown Plasma Characteristics from Single-Color Filament Terahertz Spectra. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 41(9), 1105-1113.
7. Кузнецов, А. В., Компанец, В. О., Дормидонов, А. Е., Чекалин, С. В., Шленов, С. А., & Кандидов, В. П. (2016). Периодическая структура из центров окраски, наведенная при филаментации фемтосекундного лазерного излучения среднего ИК диапазона в кристалле LiF. *Квантовая электроника*, 46(4), 379-386.
8. Chanal, M., Fedorov, V. Y., Chambonneau, M., Clady, R., Tzortzakis, S., & Grojo, D. (2017). Crossing the threshold of ultrafast laser writing in bulk silicon. *Nature communications*, 8(1), 1-6.
9. Shumakova, V., Ališauskas, S., Malevich, P., Gollner, C., Baltuška, A., Kartashov, D., ... & Pugžlys, A. (2018). Filamentation of mid-IR pulses in ambient air in the vicinity of molecular resonances. *Optics letters*, 43(9), 2185-2188.
10. Panov, N. A., Shipilo, D. E., Saletsky, A. M., Liu, W., Polynkin, P. G., & Kosareva, O. G. (2019). Nonlinear transparency window for ultraintense femtosecond laser pulses in the atmosphere. *Physical Review A*, 100(2), 023832.

11. Panov, N. A., Shipilo, D. E., Nikolaeva, I. A., Kompanets, V. O., Chekalin, S. V., & Kosareva, O. G. (2021). Continuous transition from X-to O-shaped angle-wavelength spectra of a femtosecond filament in a gas mixture. *Physical Review A*, 103(2), L021501.
12. Jeong, T. M., Weber, S., Le Garrec, B., Margarone, D., Mocek, T., & Korn, G. (2015). Spatio-temporal modification of femtosecond focal spot under tight focusing condition. *Optics express*, 23(9), 11641-11656.
13. Stapelfeldt, H., & Seideman, T. (2003). Colloquium: Aligning molecules with strong laser pulses. *Reviews of Modern Physics*, 75(2), 543.
14. Oleinikov, P. A., & Platonenko, V. T. (1993). Raman transitions between rotational levels and self-phase modulation of subpicosecond light pulses in air. *Laser Physics*, 3(3), 618-622.

#### 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.