

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ**

**федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский  
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»**

**УТВЕРЖДЕНО**

решением ученого совета ННГУ  
протокол от "16" января 2024 г. №1

**Рабочая программа дисциплины  
Современные проблемы лазерной физики**

Уровень высшего образования  
**Подготовка научных и научно-педагогических кадров**

Программа аспирантуры  
**Лазерная физика**

Научная специальность  
**1.3.19 Лазерная физика**

Форма обучения  
**Очная**

Нижний Новгород  
2024 год

### 1. Место и цель дисциплины в структуре ПА

Дисциплина «Современные проблемы лазерной физики» относится к числу обязательных дисциплин образовательного компонента программы аспирантуры и изучается на 3 году обучения в 6 семестре.

**Цель дисциплины** – формирование целостной системы знаний по лазерной физике.

### 2. Планируемые результаты обучения по дисциплине

Выпускник, освоивший программу, должен

**знать:**

- основные концепции современной лазерной физики;
- основные методы исследований в области лазерной физики;

**уметь:**

- работать с оригинальными научными статьями;

**владеть:**

- навыками чтения и восприятия научной литературы на русском и английском языках;
- навыками восприятия материалов научных докладов.

### 3. Структура и содержание дисциплины.

Объем дисциплины (модуля) составляет 2 з.е., всего - 72 часа, из которых 10 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (занятия семинарского типа), 62 часов составляет самостоятельная работа обучающегося.

**Таблица 2**

**Структура дисциплины**

Наименование раздела дисциплины	Всего, часов	В том числе					
		Контактная работа, часов					Самостоятельная работа обучающегося, часов
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского	Занятия лабораторного	Консультации	Всего	
Линейная оптика	12		2			2	10
Взаимодействие лазерного излучения с веществом	24		4			4	20
Физика лазеров	20		2			2	18
Элементы квантовой оптики	16		2			2	14
<b>Промежуточная аттестация</b>	экзамен						
<b>Итого</b>	<b>72</b>		<b>10</b>			<b>10</b>	<b>62</b>

Таблица 3

## Содержание дисциплины

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела	Форма проведения занятия	Форма текущего контроля
1.	Линейная оптика	Уравнения Максвелла. Волновое уравнение. Теорема Пойнтинга. Дисперсия. Кристаллооптика. Приближение геометрической оптики. Матричная оптика. Дифракция света. Квазиоптическое (параксиальное) приближение при описании световых пучков. Рассеяние света. Когерентность световых волн. Волны в пространственно-периодических средах. Метаматериалы. Термодинамика излучения.	семинар	доклад
2.	Взаимодействие лазерного излучения с веществом	Основные механизмы оптической нелинейности. Тензор нелинейно-оптической восприимчивости. Уравнения для связанных волн в нелинейной среде. Генерация гармоник в среде с “квадратичной” нелинейностью. Параметрическое усиление и генерация. Вынужденное рассеяние. Обращение волнового фронта при вынужденном рассеянии световых пучков. Четырехволновое взаимодействие световых пучков в нелинейных средах. Самовоздействие световых пучков. Неустойчивость плоской волны в среде с “кубической” нелинейностью. Одно- и многофотонная ионизация атомов и молекул. Туннельная и надбарьерная ионизация атомов и ионов. Пробой газов лазерным излучением. Нагрев и испарение твердых тел лазерным излучением. Атом в сверхсильном поле.	семинар	доклад
3.	Физика лазеров	Переходы в атоме с участием электромагнитного излучения. Механизмы уширения спектральных линий. Эффекты насыщения усиления и поглощения. Коэффициент усиления непрерывного усилителя. Коэффициент усиления импульсного усилителя. Открытые резонаторы. Стационарная генерация. Уравнение для разности населенностей для 3-х-уровневой модели. Уравнение для разности населенностей для 4-х-уровневой модели. Уравнение для интенсивности поля в резонаторе. Время	семинар	доклад

		установления стационарного режима и релаксационная частота для 4-х-уровневой модели. Модуляция добротности. Генерация на двух и более продольных модах. Селекция мод. Газовые лазеры. Твердотельные лазеры. Когерентное взаимодействие света с двухуровневой средой. Усиление фемтосекундных импульсов и способы получения сверхсильных оптических полей. Методы измерения параметров фемтосекундных импульсов.		
4.	Элементы квантовой оптики	Квантование электромагнитного поля. Гамильтониан квантованного поля. Канонические переменные. Операторы напряженности электрического и магнитного полей. Разложение поля по радиационным осцилляторам. Операторы рождения и уничтожения. Концепция фотона. Пределы применимости классического описания поля. Фоковское, когерентное и сжатое состояния поля. Статистика фотонов. Формула Мандела. Перепутанные состояния света. Парадокс Эйнштейна—Подольского—Розена. Состояния Белла. Неравенства Белла. Квантовая криптография. Квантовая телепортация.	семинар	доклад

#### **4. Формы организации и контроля самостоятельной работы обучающихся**

Самостоятельная работа обучающихся включает следующие виды:

- изучение разделов дисциплины с использованием учебной литературы;
- работу с оригинальными научными статьями;
- подготовку обзора научных статей на заданную тему;
- подготовку и представление презентации обзора на научном семинаре.

Итоговый контроль качества усвоения аспирантами содержания дисциплины проводится в виде экзамена. Экзамен проводится в устной форме и заключается в ответе аспирантом на теоретические вопросы курса (с предварительной подготовкой) и последующем собеседовании в рамках тематики курса. Собеседование проводится в форме вопросов, на которые аспирант должен дать краткий ответ.

#### **5. Фонд оценочных средств для аттестации по дисциплине**

##### **5.1. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине.**

При выполнении всех работ учитываются следующие **основные критерии**:

- уровень теоретических знаний (подразумевается не только формальное воспроизведение информации, но и понимание предмета, которое подтверждается правильными ответами на дополнительные, уточняющие вопросы, заданные членами комиссии);

- умение использовать теоретические знания при анализе конкретных проблем, ситуаций;
- качество изложения материала, то есть обоснованность, четкость, логичность ответа, а также его полнота (то есть содержательность, не исключающая сжатости);
- способность устанавливать внутри- и межпредметные связи,
- оригинальность мышления, знакомство с дополнительной литературой и другие факторы.

#### ***Описание шкалы оценивания на промежуточной аттестации в форме экзамена***

Оценка *отлично* – исчерпывающее владение программным материалом, понимание сущности рассматриваемых процессов и явлений, твердое знание основных положений дисциплины, умение применять концептуальный аппарат при анализе актуальных проблем. Логически последовательные, содержательные, конкретные ответы на все вопросы.

Оценка *хорошо* – достаточно полные знания программного материала, правильное понимание сути вопросов, знание определений, умение формулировать тезисы и аргументы. Ответы последовательные и в целом правильные, хотя допускаются неточности, поверхностное знакомство с отдельными теориями и фактами, достаточно формальное отношение к рекомендованным для подготовки материалам.

Оценка *удовлетворительно* – фрагментарные знания, расплывчатые представления о предмете. Ответ содержит как правильные утверждения, так и ошибки, возможно, грубые. Испытуемый плохо ориентируется в учебном материале, не может устранить неточности в своем ответе даже после наводящих вопросов.

Оценка *неудовлетворительно* – отсутствие ответа хотя бы на один из основных вопросов, либо грубые ошибки в ответах, полное непонимание смысла проблем, не достаточно полное владение терминологией.

### ***5.2. Примеры типовых контрольных заданий или иных материалов, используемых для оценивания результатов обучения по дисциплине***

#### **Вопросы для контроля**

##### ***Линейная оптика***

Уравнения Максвелла. Волновое уравнение. Теорема Пойнтинга. Бегущие недеформирующиеся волны: плоские, сферические, цилиндрические. Поляризация световых волн. Вектор Джонса. Параметры Стокса. Матрицы Мюллера.

Временная дисперсия. Распространение оптических импульсов. Фазовая и групповая скорости. Дисперсионное искажение импульса. Энергия электромагнитного поля в диспергирующей среде.

Отражение и преломление волн на границе раздела двух сред. Закон Снелля. Формулы Френеля. Явления Брюстера и полного (внутреннего) отражения. Отражение от поверхности металла.

Кристаллооптика. Нормальные волны в одноосном кристалле. Поверхности нормалей. Лучи, лучевые поверхности. Двулучепреломление. Фазовые пластинки.

Приближение геометрической оптики при описании световых волн в неоднородных средах. Уравнение эйконала и уравнение переноса. Область применимости приближения. Описание световых пучков с помощью лучей.

Матричная оптика. Матричный метод описания лучей в центрированных оптических системах. Матрицы оптического промежутка и сферической преломляющей поверхности. Матрицы некоторых простых оптических систем. Физический смысл элементов матрицы. Правило ABCD.

Дифракция света. Метод Кирхгофа. Зоны Френеля. Волновой параметр. Дифракция Френеля и дифракция Фраунгофера. Принцип Бабиня.

Квазиоптическое (параксиальное) приближение при описании световых пучков. Параболическое уравнение. Решения параболического уравнения в однородной среде. Гауссов пучок. Комплексный параметр пучка, ширина пучка, длина Рэлея, радиус кривизны волнового фронта, расходимость пучка. Фокусировка гауссовых пучков.

Рассеяние света. Рассеяние Рэлея и рассеяние Ми. Рассеяние Мандельштама–Бриллюэна. Комбинационное (рамановское) рассеяние.

Временная и пространственная когерентность световых волн. Продольный и поперечный масштабы когерентности. Когерентность излучения тепловых источников. Дифракция случайных волновых полей, теорема Ван Циттерта–Цернике.

Волны в пространственно-периодических средах. Запрещенная зона. Фотонные кристаллы. Волноводы на основе фотонных кристаллов.

Метаматериалы. Левые среды. Бианизотропные среды.

Термодинамика излучения. Закон Стефана–Больцмана. Закон смещения Вина. Формулы Рэлея–Джинса и Планка.

### **Взаимодействие лазерного излучения с веществом**

Основные механизмы оптической нелинейности. Электронная, керровская (ориентационная), стрикционная, тепловая, фоторефрактивная нелинейности.

Тензор нелинейно-оптической восприимчивости. Среда с “квадратичной” и “кубичной” нелинейностью.

Уравнения для связанных волн в нелинейной среде. Приближение медленно меняющихся амплитуд. Условия синхронизма для нелинейных взаимодействий световых волн.

Удвоение частоты света в среде с “квадратичной” нелинейностью. Условия синхронизма. Первый и второй типы взаимодействия при удвоении частоты в кристаллах.

Генерация суммарной частоты в среде с “квадратичной” нелинейностью. Соотношения Мэнли–Роу. Генерация разностной частоты.

Параметрическое усиление и генерация. Одно- и двухрезонаторные параметрические генераторы света. Частотная перестройка параметрического генератора.

Вынужденное рассеяние световых пучков. Основные механизмы вынужденного рассеяния. Пороговая мощность, режим насыщения.

Вынужденное рассеяние Мандельштама–Бриллюэна. Стационарное и нестационарное рассеяние. Вынужденное температурное рассеяние.

Вынужденное комбинационное рассеяние света. Параметрическая связь “стоксовой” и “антистоксовой” компонент при вынужденном комбинационном рассеянии.

Обращение волнового фронта (ОВФ) при вынужденном рассеянии световых пучков. Условия существования ОВФ при вынужденном рассеянии Мандельштама–Бриллюэна. Использование эффекта ОВФ.

Четырехволновое взаимодействие световых пучков в нелинейных средах. Вырожденное и невырожденное взаимодействия. ОВФ при четырёхволновом взаимодействии.

Самовоздействие световых пучков. Основные проявления самовоздействия в среде с “кубичной” нелинейностью (само модуляция, самофокусировка или самодефокусировка).

Самофокусировка светового пучка. Критическая мощность. Безаберрационное приближение при описании самофокусировки. Многофокусность.

Неустойчивость плоской волны в среде с “кубичной” нелинейностью. Связь неустойчивости и самофокусировки волн.

Одно- и многофотонная ионизация атомов и молекул. Туннельная и надбарьерная ионизация атомов и ионов. Пондеромоторное ускорение фотоэлектронов. Уширение спектра. Генерация высоких оптических гармоник.

Пробой газов лазерным излучением. Нагрев и испарение твердых тел лазерным излучением.

Атом в сверхсильном поле. Формула Келдыша, многофотонный и туннельный пределы.

### **Физика лазеров**

Переходы в атоме с участием электромагнитного излучения. Спонтанные и вынужденные переходы. Коэффициенты Эйнштейна.

Механизмы уширения спектральных линий. Однородное и неоднородное уширение.

Эффекты насыщения усиления и поглощения. Сечение перехода. Интенсивность насыщения.

Коэффициент усиления непрерывного усилителя.

Коэффициент усиления импульсного усилителя. Формула Франца-Нодвига.

Открытые резонаторы. Области устойчивости и неустойчивости. Собственные моды устойчивого резонатора. Дифракционные потери. Условие самовозбуждения открытого резонатора.

Стационарная генерация. Оптимальный коэффициент отражения зеркала (резонатор Фабри-Перо и кольцевой резонатор).

Уравнение для разности населенностей для 3-х-уровневой модели. Выходная мощность непрерывного генератора.

Уравнение для разности населенностей для 4-х-уровневой модели. Выходная мощность непрерывного генератора.

Уравнение для интенсивности поля в резонаторе. Время установления стационарного режима и релаксационная частота для 3-х-уровневой модели.

Время установления стационарного режима и релаксационная частота для 4-х-уровневой модели. Свободная генерация.

Модуляция добротности: идея, уравнения, оптимальный коэффициент отражения выходного зеркала, длительность импульса, методы реализации.

Генерация на двух и более продольных модах. Синхронизация мод: идея, уравнения, параметры выходного излучения. Понятие об импульсно-периодическом режиме.

Селекция мод (продольных, поперечных, поляризационных). Подавление двунаправленной генерации в кольцевом резонаторе.

Газовые лазеры (химические, фотодиссоционные эксимерные и т.д.).

Твердотельные лазеры. Лазеры на красителях. Полупроводниковые лазеры.

Когерентное взаимодействие света с двухуровневой средой. Нутация. Пи-импульсы. Самоиндуцированная прозрачность. Фотонное эхо.

Усиление фемтосекундных импульсов и способы получения сверхсильных оптических полей. Метод усиления чирпированных импульсов (CRA). Параметрическое усиление чирпированных импульсов (OPCRA).

Методы измерения параметров фемтосекундных импульсов. Сканирующий и одноимпульсный автокорреляторы. Спектральные измерители.

### **Элементы квантовой оптики**

Квантование электромагнитного поля. Гамильтониан квантованного поля. Канонические переменные. Операторы напряженности электрического и магнитного полей. Разложение поля по радиационным осцилляторам. Операторы рождения и уничтожения. Концепция фотона. Пределы применимости классического описания поля.

Фоковское, когерентное и сжатое состояния поля. Статистика фотонов. Формула Манделя.

Перепутанные состояния света. Парадокс Эйнштейна—Подольского—Розена. Состояния Белла. Неравенства Белла. Квантовая криптография. Квантовая телепортация.

## **6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины.**

### **а) Основная литература**

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. Изд. 2-е. М.: Наука, 1973.
2. М.Б. Виноградова, О.В. Руденко, А.П. Сухоруков Теория волн. М.: Наука, 1979.
3. Звелто О. - Принципы лазеров: [монография]. - СПб. ; М. ; Краснодар: Лань, 2008. - 720 с.  
(Звелто О. - Принципы лазеров. - М.: Мир, 1990. - 558 с.)

### **б) Дополнительная литература**

1. Крюков П.Г. Фемтосекундные импульсы. Введение в новую область лазерной физики. М.: Физматлит, 2008, 208 с.
2. Гудмен Дж. Введение в Фурье-оптику. М., 1970
4. Желтиков А.М., Сверхкороткие импульсы и методы нелинейной оптики.- М.: ФИЗМАТ-ЛИТ, 2006. – 294с.
5. Желтиков А.М., Микроструктурированные световоды в оптических технологиях - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 191с.
6. Манцызов Б.И. Когерентная и нелинейная оптика фотонных кристаллов. Москва, ФИЗ-МАТЛИТ, 2009. -208 с.

## **7. Материально-техническое обеспечение дисциплины**

- помещения для проведения занятий: лекционного типа, семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации, а также помещения для хранения и профилактического обслуживания оборудования и помещения для самостоятельной работы обучающихся, оснащенные компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду ННГУ;
  - материально-техническое обеспечение, необходимое для реализации дисциплины, включая лабораторное оборудование;
  - лицензионное программное обеспечение: *Windows, Microsoft Office*;
  - обучающиеся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья обеспечиваются электронными и (или) печатными образовательными ресурсами в формах, адаптированных к ограничениям их здоровья.
- ресурсам.

Рабочая программа учебной дисциплины составлена в соответствии с учебным планом, Положением о подготовке научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре) (Постановление Правительства РФ от 30.11.2021 № 2122), Федеральными государственными требованиями к структуре программ подготовки



научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре) (Приказ Минобрнауки РФ от 20.10.2021 № 951).

Авторы:

Автор: д.ф.-м.н. Бакунов М.И.

Рецензент: к.-ф.-м.н. Савикин А.П.

Заведующий кафедрой общей физики: д.ф.-м.н. Бакунов М.И.

**Программа одобрена** на заседании методической комиссии от 18 декабря 2023 года протокол № 09/23.