

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ЛУГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ ВЛАДИМИРА ДАЛЯ»

Институт технологий и инженерной механики  
Кафедра физики

УТВЕРЖДАЮ

Директор института технологий и  
инженерной механики

Могильная Е.П.

« 18 » 04 2023 г.



РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

«НЕЛИНЕЙНАЯ ОПТИКА»

По направлению подготовки 03.03.02 Физика  
Профиль подготовки «Физика»

Луганск 2023

## Лист согласования РПУД

Рабочая программа учебной дисциплины «Нелинейная оптика» по направлению подготовки 03.03.02 Физика. – 18 с.

Рабочая программа учебной дисциплины «Механика» составлена с учетом Федерального Государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 03.03.02 Физика, утвержденного приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от «07» августа 2020 года №891.

### СОСТАВИТЕЛЬ:

кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры физики  
Харченко Е.И.

Рабочая программа дисциплины рассмотрена на заседании кафедры физики  
«18» 04 2023 г., протокол № 9

Заведующий кафедрой физики Корсунов К.А.

Переутверждена: «  »    20   г., протокол №   

Директор института технологий и инженерной механики Могильная Е.П.

Рекомендована на заседании учебно-методической комиссии института технологий и инженерной механики  
«18» 04 2023 г., протокол № 3.

Председатель учебно-методической комиссии  
института технологий и инженерной механики Ясуник С.Н.

© Харченко Е.И., 2023 год

©ФГБОУ ВО «ЛГУ им. В. ДАЛЯ», 2023 год

## Структура и содержание дисциплины

### 1. Цели и задачи дисциплины, ее место в учебном процессе

Цель изучения дисциплины «Нелинейная оптика» – рассмотрение теоретических основ взаимодействия лазерного излучения с веществом, ознакомление с различными механизмами оптической нелинейности и нелинейно-оптическими методами преобразования световых полей, управления частотой и волновым фронтом лазерного излучения, применение нелинейной оптики в научных исследованиях и технологиях.

Задачи изучения дисциплины:

изучить основные физические принципы, лежащие в основе нелинейной оптики;

ознакомить студента с основными нелинейными оптическими явлениями, методами их наблюдения и экспериментального исследования, показать практическую значимость этих исследований;

сообщить основные законы нелинейной волновой оптики и квантовой теории, показать, что электромагнитное поле и частицы вещества в одних физических ситуациях проявляют волновые, а в других – корпускулярные свойства (корпускулярно-волновой дуализм);

формировать навыки экспериментальной работы, научить правильно выразить и интерпретировать физические идеи, сформулировать и количественно решать возникающие задачи

### 2. Место дисциплины в структуре ООП ВО

Дисциплина «Нелинейная оптика» входит в модуль естественных дисциплин обязательной части учебного плана подготовки студентов по направлению подготовки 03.03.02 Физика.

Для овладения дисциплиной требуется знание таких дисциплин: «Электричество и магнетизм», «Оптика», «Физика атома и атомных явлений» и является основой для изучения следующих дисциплин «Физика конденсированного состояния», «Квантовая теория», «Физика плазмы».

### 3. Требования к результатам освоения содержания дисциплины

| Код и наименование компетенции                                                                                                                    | Индикаторы достижений компетенции (по реализуемой дисциплине)                                                                                                                                                                                | Перечень планируемых результатов                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ОПК-1.<br>Способен применять базовые знания в области физико-математических и (или) естественных наук в сфере своей профессиональной деятельности | ОПК-1.1. Обладает базовыми знаниями в области физико-математических и (или) естественных наук<br>ОПК-1.2. Применяет базовые знания в области физико-математических и (или) естественных наук для решения задач профессиональной деятельности | Знать: основные физические принципы, лежащие в основе нелинейной оптики; описание распространения электромагнитных волн в нелинейной среде; понятие нелинейной среды и механизмы оптической нелинейности; основные нелинейные явления, возникающие при взаимодействии лазерного излучения с веществом.<br>Уметь: рассчитывать различные эффекты в нелинейных средах при |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | взаимодействии лазерного излучения с веществом, рассчитать эффективность генерации второй и более высоких гармоник; решать уравнения Максвелла для нелинейных сред; решать связанные волновые уравнения.<br>Владеть навыками применения полученных знаний для решения прикладных задач нелинейной оптики.                                                                                                   |
| ОПК-2.<br>Способен проводить научные исследования физических объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные                                                                                                                                                      | ОПК-2.1. Умеет обрабатывать и представлять экспериментальные данные<br>ОПК-2.2. Владеет методами физических исследований<br>ОПК-2.3 Применяет методы исследования физических объектов, систем и процессов для решения задач профессиональной деятельности                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Знать: методы обработки экспериментальных данных, полученных при изучении нелинейных эффектов;<br>Уметь: применять методы расчета параметров генерации второй и более высоких гармоник;<br>Владеть: методами физических исследований основных нелинейных явлений, возникающих при взаимодействии лазерного излучения с веществом.                                                                           |
| ПК-1.<br>Способность проводить научные исследования в избранной области экспериментальных и (или) теоретических физических исследований с помощью современной приборной базы (в том числе сложного физического оборудования) и информационных технологий с учетом отечественного и зарубежного опыта | ПК-1.1. Знает теоретические основы физических методов исследования и методы анализа свойств физических систем разного уровня организации.<br>ПК-1.2. Знает методы экспериментальных исследований в физике, возможности и области использования аппаратуры и оборудования для выполнения физических исследований.<br>ПК-1.3. Умеет: осуществлять выбор оборудования и методик для решения конкретных задач, эксплуатировать современную физическую аппаратуру и оборудование.<br>ПК-1.4. Владеет навыками использования современных методов исследования в выбранной области. | Знать: теоретические основы физических методов исследования основных нелинейных эффектов, возникающих при взаимодействии лазерного излучения с веществом.<br>Уметь применять методы экспериментальных исследований в нелинейной оптике, возможности использования физического оборудования для исследования нелинейных явлений.<br>Владеть: навыками использования современных методов в нелинейной оптике. |

## 4. Структура и содержание дисциплины

### 4.1. Объем учебной дисциплины и виды учебной работы

| Вид учебной работы                                                             | Объем часов (зач. ед.)           |                                   |
|--------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
|                                                                                | Очная форма                      | Заочная форма                     |
| <b>Общая учебная нагрузка (всего)</b>                                          | <b>144</b><br><b>(4 зач. ед)</b> | <b>Не</b><br><b>предусмотрена</b> |
| <b>Обязательная аудиторная учебная нагрузка (всего)</b><br><b>в том числе:</b> | <b>68</b>                        | <b>-</b>                          |
| Лекции                                                                         | 34                               | -                                 |
| Семинарские занятия                                                            | -                                | -                                 |
| Практические занятия                                                           | 34                               | -                                 |

|                                                                                                                                                                                                                                        |                |   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|---|
| Лабораторные работы                                                                                                                                                                                                                    | -              | - |
| Курсовая работа (курсовой проект)                                                                                                                                                                                                      | -              | - |
| Другие формы и методы организации образовательного процесса ( <i>расчетно-графические работы, групповые дискуссии, ролевые игры, тренинг, компьютерные симуляции, интерактивные лекции, семинары, анализ деловых ситуаций и т.п.</i> ) | -              | - |
| <b>Самостоятельная работа студента / форма контактной работы</b>                                                                                                                                                                       | <b>49 / 27</b> | - |
| Форма аттестации                                                                                                                                                                                                                       | экзамен        | - |

## 4.2. Содержание разделов дисциплины

### Семестр 6

#### Тема 1. Предмет нелинейной оптики.

Введение. Предмет нелинейной оптики. История развития нелинейной оптики. Классификация нелинейно-оптических эффектов. Нелинейная поляризация. Механизмы оптической нелинейности. Эксперимент Франкена. Физические причины нелинейности. Тепловая нелинейность. Эффекты электрострикции. Ориентационная, керровская нелинейность. Электронная нелинейность.

**Тема 2.** Уравнения Максвелла-Лоренца. Феноменологическое описание оптических восприимчивостей.

Электромагнитные процессы в нелинейной среде. Уравнения Максвелла. Поляризация. Поляризация диэлектриков в постоянном электрическом поле. Поляризация диэлектриков в постоянном электрическом поле в случае газа, атомы которого не обладают дипольным моментом.

#### Тема 3. Нелинейные оптические явления.

Нелинейно-оптические эффекты. Эффекты, связанные с поляризацией второго порядка. Эффекты, связанные с поляризацией третьего порядка. Непараметрические нелинейно-оптические явления. Фазовый синхронизм. Поляризация диэлектрика в световом поле малой интенсивности. Поляризация диэлектрика под действием света большой интенсивности. Нелинейные оптические явления в изотропной среде. Нелинейные оптические явления, возникающие под действием только оптических полей. Нелинейные оптические явления в статическом электрическом поле.

#### Тема 4. Распространение световых волн в нелинейной среде.

Условия фазового (волнового) синхронизма. Коллинеарный синхронизм. Векторный синхронизм. Распространение световых волн в дисперсионной нелинейной среде. Тензоры нелинейной восприимчивости. Феноменологическое описание нелинейных оптических явлений в анизотропной среде. Нелинейные оптические явления при одновременном воздействии постоянного электрического поля и поля электромагнитной волны. Система связанных волновых уравнений в нелинейной среде. Уравнения Максвелла. Уравнение электромагнитных волн в нелинейной среде. Укороченные уравнения для амплитуд связанных волн в изотропной нелинейной среде. Укороченные уравнения для прозрачных одноосных кристаллов. Укороченные уравнения для случая трех различных частот.

**Тема 5.** Метод медленно меняющихся амплитуд. Генерация второй гармоники.

Метод медленно меняющихся амплитуд. Стационарные укороченные уравнения. Трехфотонные взаимодействия. Соотношения Мэнли-Роу. Генерация второй гармоники на основе интегрального подхода. Длина когерентности. Генерация второй гармоники в приближении заданного поля. Фазовый синхронизм и методы его реализации. Виды фазового синхронизма. Точное решение для генерации второй гармоники. Уравнения для медленно меняющихся действительных амплитуд и фаз. Решение уравнений при точном синхронизме. Случай отсутствия второй гармоники на входе нелинейной среды. Трехфотонные процессы. Система нелинейных нестационарных уравнений. Нестационарная генерация второй гармоники.

#### **Тема 6. Параметрические процессы.**

Способы построения перестраиваемых лазеров. Параметрическое усиление. Коэффициенты усиления усилителя. Параметрический генератор света. Однорезонаторный и двухрезонаторный параметрический генератор света. Фазовый синхронизм. Перестроечные характеристики и способы перестройки частоты в параметрических генераторах света. Особенности газовых атомно-молекулярных нелинейно-оптических сред. Четырехфотонные взаимодействия. Укороченные уравнения. Резонансные четырехфотонные процессы.

#### **Тема 7. Самофокусировка.**

Самовоздействие световых волн. Механизмы возникновения нелинейности третьего порядка. Тепловая нелинейность. Крупномасштабная самофокусировка.

#### **Тема 8. Физический механизм рассеяния света.**

Вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна. Спонтанное рассеяние. Спонтанное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна. Электрострикция. ВРМБ-усиление. ВРМБ-генерация. Вынужденное комбинационное рассеяние. Комбинационное (рамановское) рассеяние света. Физический механизм рассеяния. Вынужденное рассеяние в лазерной технике.

### **4.3. Лекции**

| №<br>п/п | Название темы                                           | Объем часов |               |
|----------|---------------------------------------------------------|-------------|---------------|
|          |                                                         | Очная форма | Заочная форма |
| 1        | Предмет нелинейной оптики, история ее развития          | 2           | -             |
| 2        | Механизмы оптической нелинейности                       | 2           | -             |
| 3        | Электромагнитные процессы в нелинейной среде            | 2           | -             |
| 4        | Нелинейно-оптические эффекты                            | 2           | -             |
| 5        | Поляризация диэлектрика в световом поле                 | 2           | -             |
| 6        | Нелинейные оптические явления в изотропной среде        | 2           | -             |
| 7        | Условия фазового (волнового) синхронизма                | 2           | -             |
| 8        | Нелинейная поляризация в анизотропной среде             | 2           | -             |
| 9        | Система связанных волновых уравнений в нелинейной среде | 2           | -             |
| 10       | Метод медленно меняющихся амплитуд                      | 2           | -             |
| 11       | Генерация второй гармоники                              | 2           | -             |
| 12       | Точное решение для генерации второй гармоники           | 2           | -             |
| 13       | Параметрическое усиление                                | 2           | -             |
| 14       | Особенности газовых нелинейно-оптических сред           | 2           | -             |
| 15       | Самовоздействие световых волн                           | 2           | -             |

|               |                                              |           |   |
|---------------|----------------------------------------------|-----------|---|
| 16            | Вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна | 2         | - |
| 17            | Вынужденное комбинационное рассеяние         | 2         | - |
| <b>Итого:</b> |                                              | <b>34</b> | - |

#### 4.4. Практические занятия

| №<br>п/п      | Название темы                                                   | Объем часов |               |
|---------------|-----------------------------------------------------------------|-------------|---------------|
|               |                                                                 | Очная форма | Заочная форма |
| 1             | Предмет нелинейной оптики, история ее развития.                 | 2           | -             |
| 2             | Когерентные нелинейно-оптические эффекты.                       | 2           | -             |
| 3             | Нелинейный отклик среды.                                        | 2           | -             |
| 4             | Феноменологическое описание восприимчивостей.                   | 2           | -             |
| 5             | Метод медленно меняющихся амплитуд.                             | 2           | -             |
| 6             | Генерация второй гармоники.                                     | 2           | -             |
| 7             | Точное решение для генерации второй гармоники.                  | 2           | -             |
| 8             | Параметрическое усиление.                                       | 2           | -             |
| 9             | Нестационарные укороченные уравнения.                           | 2           | -             |
| 10            | Нестационарная генерация второй гармоники.                      | 2           | -             |
| 11            | Пространственно-временная аналогия.                             | 2           | -             |
| 12            | Взаимодействие волн в средах с отрицательной дисперсией.        | 2           | -             |
| 13            | Особенности газовых нелинейно-оптических сред.                  | 2           | -             |
| 14            | Ограничивающие процессы.                                        | 2           | -             |
| 15            | Вынужденное комбинационное рассеяние.                           | 2           | -             |
| 16            | Антистоксовы компоненты вынужденного комбинационного рассеяния. | 2           | -             |
| 17            | Обращение волнового фронта. Самовоздействие световых волн       | 2           | -             |
| <b>Итого:</b> |                                                                 | <b>34</b>   | -             |

#### 4.5. Лабораторные работы по дисциплине «Нелинейная оптика» не предполагаются учебным планом.

#### 4.6. Самостоятельная работа студентов

| №<br>п/п | Название темы                                                                           | Вид СРС                                                                | Объем часов |               |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-------------|---------------|
|          |                                                                                         |                                                                        | Очная форма | Заочная форма |
| 1        | Предмет нелинейной оптики                                                               | Изучение лекционного материала.<br>Подготовка к практическим занятиям  | 6           | -             |
| 2        | Уравнения Максвелла-Лоренца.<br>Феноменологическое описание оптических восприимчивостей | Изучение лекционного материала.<br>Подготовка к практическим занятиям  | 6           | -             |
| 3        | Нелинейные оптические явления                                                           | Изучение лекционного материала.<br>Подготовка к практическим занятиям  | 6           | -             |
| 4        | Распространение световых волн в нелинейной среде                                        | Изучение лекционного материала.<br>Подготовка к практическим занятиям  | 6           | -             |
| 5        | Метод медленно меняющихся амплитуд. Генерация второй гармоники                          | Изучение лекционного материала.<br>Подготовка к практическим занятиям  | 6           | -             |
| 6        | Параметрические процессы                                                                | Изучение лекционного материала.<br>Подготовка к практическим занятиям. | 6           | -             |
| 7        | Самофокусировка                                                                         | Изучение лекционного материала.<br>Подготовка к практическим занятиям  | 6           | -             |
| 8        | Физический механизм                                                                     | Изучение лекционного материала.                                        | 7           | -             |

|               |                 |                                    |           |          |
|---------------|-----------------|------------------------------------|-----------|----------|
|               | рассеяния света | Подготовка к практическим занятиям |           |          |
| <b>Итого:</b> |                 |                                    | <b>49</b> | <b>-</b> |

#### **4.7. Курсовые работы/проекты по дисциплине «Нелинейная оптика» не предполагаются учебным планом.**

### **5. Образовательные технологии**

Преподавание дисциплины ведется с применением следующих видов образовательных технологий: объяснительно-иллюстративного обучения (технология поддерживающего обучения, технология проведения учебной дискуссии), информационных технологий (презентационные материалы), развивающих и инновационных образовательных технологий.

Практические занятия проводятся с использованием развивающих, проблемных, проектных, информационных (использование электронных образовательных ресурсов (электронный конспект) образовательных технологий.

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

#### **а) основная литература:**

1. Беспрозванных, В.Г. Нелинейная оптика: учеб. пособие / В.Г. Беспрозванных, В.П. Первадчук. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2011. – 200 с.
2. Дмитриев В.Г. Прикладная нелинейная оптика / В.Г. Дмитриев, Л.В. Тарасов. – М.: Физматлит. 2004. – 512 с.
3. Скалли, М.О. Квантовая оптика / М.О. Скалли, М.С. Зибайри. – М.: Физматлит, 2003. – 512 с.
4. Слабко, В. В. Нелинейная оптика: конспект лекций / В. В. Слабко, А. В. Закарлюка, Н. Э. Лямкина. – Красноярск: ИПК СФУ, 2008. – 106 с.
5. Розанов Н.Н. Нелинейная оптика: учеб. пособие. Ч.1. Уравнения распространения излучения и нелинейный отклик среды / Н.Н. Розанов – СПб: СПбГУИТМО, 2008. – 95 с.

#### **б) дополнительная литература:**

1. Ахманов, С.А. Физическая оптика / С.А. Ахманов, С.Ю. Никитин. – М.: Изд-во МГУ, 1998. – 655 с.
2. Ахманов, С. А. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов / С. А. Ахманов, В. А. Вислоух, А. С. Чиркин. – М.: Наука, 1988. – 326 с.
3. Шен И. Р. Принципы нелинейной оптики / И.Р. Шен. М.: Наука. 1989 – 560 с.
4. Толстик А.Л. Лазерная физика. Лабораторный практикум / А.Л. Толстик, И.Н. Агишев, Е.А. Мельникова. – Мн.: БГУ. 2006.
5. Слабко, В. В. Нелинейная оптика: метод. указания к практическим занятиям / сост.: В. В. Слабко, А. В. Закарлюка. – Красноярск: ИПК СФУ, 2008. – 40 с.
6. Делоне Н.Б. Нелинейная оптика / Н.Б. Делоне. – М.: Физматлит. 2003.

7. Делоне Н.Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. – М.: Наука, 1989. – 278 с.

8. Цернике, Ф. Прикладная нелинейная оптика / Ф. Цернике, Дж. Медвинтер. – М.: Мир, 1976.

#### **в) методические указания:**

1. Конспект лекций по дисциплине «Нелинейная оптика», Часть 1. «Нелинейная поляризация» (для студентов, обучающихся по направлению подготовки 03.03.02 «Физика» (в 2-х частях). / Сост.: Е.И. Харченко, А.В. Чаленко – Луганск: Изд-во ЛНУ им. В. Даля, 2018. – 82 с.

2. Конспект лекций по дисциплине «Нелинейная оптика», Часть 2. «Нелинейно-оптические эффекты» (для студентов, обучающихся по направлению подготовки 03.03.02 «Физика» (в 2-х частях). / Сост.: Е.И. Харченко, А.В. Чаленко – Луганск: Изд-во ЛНУ им. В. Даля, 2018. – 78 с.

3. Методические указания к практическим занятиям по дисциплине «Нелинейная оптика», (для студентов, обучающихся по направлению 03.03.02 «Физика» / Сост.: Е.И. Харченко А.В. Чаленко, – Луганск: Изд-во ЛНУ им. В. Даля, 2019. – 33 с.

4. Методические указания к самостоятельной работе по дисциплине «Нелинейная оптика» (для студентов, обучающихся по направлению подготовки 03.03.02 «Физика» / Сост.: Е.И. Харченко, А.В. Чаленко – Луганск: Изд-во ЛНУ им. В.Даля, 2019. – 22 с.

#### **г) Интернет-ресурсы:**

•Министерство образования и науки Российской Федерации – <http://минобрнауки.пф/>

•Федеральная служба по надзору в сфере образования и науки – <http://obrnadzor.gov.ru/>

•Министерство образования и науки Луганской Народной Республики – <https://minobr.su>

•Народный совет Луганской Народной Республики – <https://nslnr.su>

•Портал Федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования – <http://fgosvo.ru>

•Федеральный портал «Российское образование» – <http://www.edu.ru/>

•Информационная система «Единое окно доступа к образовательным ресурсам» – <http://window.edu.ru/>

•Федеральный центр информационно-образовательных ресурсов – <http://fcior.edu.ru/>

#### **Электронные библиотечные системы и ресурсы**

•Электронно-библиотечная система «Консультант студента» – <http://www.studentlibrary.ru/cgi-bin/mb4x>

•Электронно-библиотечная система «StudMed.ru» – <https://www.studmed.ru>

•Электронный каталог Научно-технической библиотеки ЮРГПУ (НПИ) – <https://libweb.srspu.ru/MegaProWeb/Web>

- Образовательная платформа Юрайт – <https://urait.ru/register>
- Научная электронная библиотека eLibrary – <https://www.elibrary.ru/defaultx.asp>

### **Информационный ресурс библиотеки образовательной организации**

- Научная библиотека имени А. Н. Коняева – <http://biblio.dahluniver.ru/>

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

На лекционных занятиях используются комплекты электронных презентаций / слайдов, раздаточный материал, наглядные пособия в аудиториях, оснащенных презентационной техникой (проектор, экран, компьютер/ноутбук).

Практические и лабораторные занятия проводятся в специальных лабораториях, соответствующих действующим санитарным и противопожарным правилам и нормам.

### **Программное обеспечение:**

| <b>Функциональное назначение</b> | <b>Бесплатное программное обеспечение</b> | <b>Ссылки</b>                                                                                                                                                                                                                             |
|----------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Офисный пакет                    | Libre Office 6.3.1                        | <a href="https://www.libreoffice.org/">https://www.libreoffice.org/</a><br><a href="https://ru.wikipedia.org/wiki/LibreOffice">https://ru.wikipedia.org/wiki/LibreOffice</a>                                                              |
| Операционная система             | UBUNTU 19.04                              | <a href="https://ubuntu.com/">https://ubuntu.com/</a><br><a href="https://ru.wikipedia.org/wiki/Ubuntu">https://ru.wikipedia.org/wiki/Ubuntu</a>                                                                                          |
| Браузер                          | Firefox Mozilla                           | <a href="http://www.mozilla.org/ru/firefox/fx">http://www.mozilla.org/ru/firefox/fx</a>                                                                                                                                                   |
| Браузер                          | Opera                                     | <a href="http://www.opera.com">http://www.opera.com</a>                                                                                                                                                                                   |
| Почтовый клиент                  | Mozilla Thunderbird                       | <a href="http://www.mozilla.org/ru/thunderbird">http://www.mozilla.org/ru/thunderbird</a>                                                                                                                                                 |
| Файл-менеджер                    | Far Manager                               | <a href="http://www.farmanager.com/download.php">http://www.farmanager.com/download.php</a>                                                                                                                                               |
| Архиватор                        | 7Zip                                      | <a href="http://www.7-zip.org/">http://www.7-zip.org/</a>                                                                                                                                                                                 |
| Графический редактор             | GIMP (GNU Image Manipulation Program)     | <a href="http://www.gimp.org/">http://www.gimp.org/</a><br><a href="http://gimp.ru/viewpage.php?page_id=8">http://gimp.ru/viewpage.php?page_id=8</a><br><a href="http://ru.wikipedia.org/wiki/GIMP">http://ru.wikipedia.org/wiki/GIMP</a> |
| Редактор PDF                     | PDFCreator                                | <a href="http://www.pdfforge.org/pdfcreator">http://www.pdfforge.org/pdfcreator</a>                                                                                                                                                       |
| Аудиоплеер                       | VLC                                       | <a href="http://www.videolan.org/vlc/">http://www.videolan.org/vlc/</a>                                                                                                                                                                   |

## 8. Оценочные средства по дисциплине «Нелинейная оптика»

### Паспорт оценочных средств по учебной дисциплине «Нелинейная оптика»

Перечень компетенций (элементов компетенций), формируемых в результате освоения учебной дисциплины (модуля) или практики

| № п/п | Код контролируемой компетенции | Формулировка контролируемой компетенции                                                                                                                                                | Индикаторы достижений компетенции (по реализуемой дисциплине) | Контролируемые темы учебной дисциплины, практики                                             | Этапы формирования (семестр изучения) |
|-------|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| 1     | ОПК-1                          | Способен применять базовые знания в области физико-математических и (или) естественных наук в сфере своей профессиональной деятельности                                                | ОПК-1.1,<br>ОПК-1.2                                           | Тема 1. Предмет нелинейной оптики                                                            | 6                                     |
|       |                                |                                                                                                                                                                                        |                                                               | Тема 2. Уравнения Максвелла-Лоренца. Феноменологическое описание оптических восприимчивостей | 6                                     |
|       |                                |                                                                                                                                                                                        |                                                               | Тема 3. Нелинейные оптические явления                                                        | 6                                     |
|       |                                |                                                                                                                                                                                        |                                                               | Тема 4. Распространение световых волн в нелинейной среде                                     | 6                                     |
|       |                                |                                                                                                                                                                                        |                                                               | Тема 5. Метод медленно меняющихся амплитуд. Генерация второй гармоники.                      | 6                                     |
|       |                                |                                                                                                                                                                                        |                                                               | Тема 6. Параметрические процессы.                                                            | 6                                     |
|       |                                |                                                                                                                                                                                        |                                                               | Тема 7. Самофокусировка                                                                      | 6                                     |
|       |                                |                                                                                                                                                                                        |                                                               | Тема 8. Физический механизм рассеяния света                                                  | 6                                     |
| 2     | ОПК-2                          | Способен проводить научные исследования физических объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные                                                  | ОПК-2.1,<br>ОПК-2.2,<br>ОПК-2.3                               | Темы 1-8                                                                                     | 6                                     |
|       | ПК-1                           | Способен проводить научные исследования в избранной области экспериментальных и (или) теоретических физических исследований с помощью современной приборной базы (в том числе сложного | ПК-1.1,<br>ПК-1.2,<br>ПК-1.3,<br>ПК-1.4                       | Темы 1-8                                                                                     | 6                                     |

|  |  |                                                                                                   |  |  |  |
|--|--|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|
|  |  | физического оборудования) и информационных технологий с учетом отечественного и зарубежного опыта |  |  |  |
|--|--|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|

### Показатели и критерии оценивания компетенций, описание шкал оценивания

| № п/п | Код контролируемой компетенции                  | Перечень планируемых результатов                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Контролируемые темы учебной дисциплины | Наименование оценочного средства                   |
|-------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 1.    | ОПК-1<br>ОПК-1.1<br>ОПК-1.2                     | <b>Знать:</b> основные физические принципы, лежащие в основе нелинейной оптики; описание распространения электромагнитных волн в нелинейной среде; понятие нелинейной среды и механизмы оптической нелинейности; основные нелинейные явления, возникающие при взаимодействии лазерного излучения с веществом.<br><b>Уметь:</b> рассчитывать различные эффекты в нелинейных средах при взаимодействии лазерного излучения с веществом, рассчитать эффективность генерации второй и более высоких гармоник; решать уравнения Максвелла для нелинейных сред; решать связанные волновые уравнения.<br><b>Владеть:</b> навыками применения полученных знаний для решения прикладных задач нелинейной оптики. | Темы 1-8                               | Вопросы экзаменационных работ, контрольные работы. |
| 2     | ОПК-2<br>ОПК-2.1<br>ОПК-2.2<br>ОПК-2.3          | <b>Знать:</b> методы обработки экспериментальных данных, полученных при изучении нелинейных эффектов;<br><b>Уметь:</b> применять методы расчета параметров генерации второй и более высоких гармоник;<br><b>Владеть:</b> методами физических исследований основных нелинейных явлений, возникающих при взаимодействии лазерного излучения с веществом.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Темы 1-8                               | Вопросы экзаменационных работ, контрольные работы. |
| 2     | ПК-1<br>ПК-1.1,<br>ПК-1.2,<br>ПК-1.3,<br>ПК-1.4 | <b>Знать:</b> теоретические основы физических методов исследования основных нелинейных эффектов, возникающих при взаимодействии лазерного излучения с веществом.<br><b>Уметь:</b> использовать методы экспериментальных исследований в нелинейной оптике, возможности использования физического оборудования для исследования нелинейных явлений.<br><b>Владеть:</b> навыками использования современных методов исследования в нелинейной оптике                                                                                                                                                                                                                                                        | Темы 1-8                               | Вопросы экзаменационных работ, контрольные работы  |

**Вопросы к контрольным работам:**

1. Объяснить возникновение эффекта насыщения, используя простейшую модель поглощающей среды. Чем объясняется замедление роста поглощаемой мощности при увеличении интенсивности?
2. Какую роль играют эффекты насыщения в лазерах?
3. В чем состоят основные отличия закономерностей многофотонного поглощения и многофотонного фотоэффекта от законов соответствующих однофотонных явлений?
4. Почему рассмотренные здесь нелинейные оптические эффекты называют некогерентными?
5. Как нужно видоизменить модель, используемую в классической электронной теории дисперсии, чтобы объяснить нелинейную поляризуемость молекул?
6. Объясните с помощью модели ангармонического осциллятора возникновение вторичных волн с кратными частотами.
7. Какими причинами может быть обусловлена зависимость показателя преломления от интенсивности света?
8. Какой вид имеет феноменологическое материальное уравнение для нелинейной среды?
9. В чем заключается метод последовательных приближений для решения уравнений Максвелла в случае нелинейной среды?
10. В чем заключается эффект оптического детектирования?
11. Как изменяется интенсивность второй гармоники в зависимости от расстояния, пройденного волной в нелинейной среде?
12. Что называется когерентной длиной и каков ее физический смысл?
13. Какое условие должно выполняться для эффективной передачи энергии исходного пучка во вторую гармонику?
14. Как можно обеспечить пространственный синхронизм исходной волны и второй гармоники?
15. В чем преимущество внутрирезонаторного метода удвоения частоты лазерного излучения?
16. В чем заключается процесс параметрического преобразования частоты света в нелинейной среде?
17. Какие перспективы связаны с возможностью параметрического преобразования «вверх» частоты слабого инфракрасного излучения?
18. Объясните принцип параметрического усиления света в нелинейной среде. Какую роль играет здесь условие пространственного синхронизма?
19. В чем состоит параметрическое усиление света с точки зрения квантовых представлений?
20. Объясните принцип действия параметрического генератора света.
21. Каким способом можно осуществлять плавную перестройку частоты генерируемого излучения?
22. Проведите аналогию между рассеянием когерентного света на упругой волне и восстановлением фазовой объемной голограммы.

23. Какими элементарными процессами описывается рассеяние Мандельштама-Бриллюэна в квантовой теории?

24. Поясните физический механизм параметрического усиления упругой и рассеянной волн за счет энергии волны накачки при ВРМБ.

25. Почему для обращения волнового фронта с помощью ВРМБ световой пучок должен быть пространственно неоднородным?

### **Критерии и шкала оценивания по оценочному средству контрольная работа**

| Шкала оценивания        | Критерий оценивания                                                                                   |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| отлично (5)             | Контрольная работа выполнена на высоком уровне (правильные ответы даны на 90-100% вопросов/задач)     |
| хорошо (4)              | Контрольная работа выполнена на среднем уровне (правильные ответы даны на 75-89% вопросов/задач)      |
| удовлетворительно (3)   | Контрольная работа выполнена на низком уровне (правильные ответы даны на 50-74% вопросов/задач)       |
| неудовлетворительно (2) | Контрольная работа выполнена на неудовлетворительном уровне (правильные ответы даны менее чем на 50%) |

### **Оценочные средства для промежуточной аттестации (экзамен)**

#### **Теоретические вопросы**

1. Предмет нелинейной оптики.
2. Механизмы оптической нелинейности.
3. Некогерентные нелинейные эффекты.
4. Электромагнитные процессы в нелинейной среде.
5. Поляризация диэлектрика в световом поле.
6. Нелинейные оптические явления в изотропной среде.
7. Нелинейная поляризация в анизотропной среде.
8. Система связанных волновых уравнений в нелинейной среде.
9. Обобщение укороченных уравнений на случай одноосных кристаллов.
10. Генерация второй гармоники.
11. Точное решение для генерации второй гармоники.
12. Вынужденное комбинационное рассеяние света.
13. Уравнения Максвелла.
14. Интегральное рассмотрение генерации второй гармоники. Вектор поляризации.
15. Общие свойства тензора нелинейной поляризации. Метод медленно меняющихся амплитуд. Соотношения Менли-Роу.
16. Фазовый синхронизм Условия фазового (волнового) синхронизма.
17. Виды фазового синхронизма.
18. Уравнения для действительных амплитуд и фаз. Захват фаз.
19. Параметрическое усиление. Параметрический генератор света.
20. Нестационарная генерация второй гармоники
21. Метод медленно меняющихся амплитуд в теории распространения волн. Уравнения для пучков и импульсов. Трехфотонные процессы.

22. Укороченное волновое уравнение с учетом временной и пространственной дисперсии.
23. Параметрическое взаимодействие волн с учетом пространственной дисперсии.
24. Взаимодействие волн с отрицательной дисперсией.
25. Особенности газовых нелинейно-оптических сред
26. Вынужденное комбинационное рассеяние света.
27. Комбинационное рассеяние. Вынужденное комбинационное рассеяние Мандельштам-Бриллюэна
28. Обращение волнового фронта.
29. Самовоздействие световых волн.

### Практические задания

1. Получить формулу для  $I_0$  и оценить интенсивность светового пучка, диаметром 3 мм, необходимую для наблюдения эффектов связанных с тепловой нелинейностью в среде с параметрами:  $\alpha_0 = 0.5 \text{ см}^{-1}$ ,  $\rho_0 C_0 \approx 1$ ,  $D = 5 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}$ ,  $\partial n / \partial T = 10^{-5} \text{ К}^{-1}$ ,  $\lambda = 1.06 \text{ мкм}$ .
2. Получить выражение для времени релаксации гиперзвука в среде и оценить его, если:  $\rho_0 = 4.55 \text{ г/см}^3$ ,  $\eta = 1$  Пуаз; индуцируется двумя встречными волнами с  $\lambda = 1.064 \text{ мкм}$ .
3. Показать, что в случае дефекта в кристалле, связанного с наличием 2-х зарядного иона в узле кристаллической решетки вместо однозарядного, потенциал будет иметь такой вид: 
$$V(x) = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_0} \left( C_1 + C_2 \frac{x^2}{r_0^2} + C_3 \frac{x^3}{r_0^3} + \dots \right).$$
4. Написать систему связанных уравнений для четырех волн в среде с кубической нелинейностью.
5. Получить условие на показатели преломления при генерации второй гармоники в случае ое-синхронизма.
6. Найти направление распространения обыкновенной волны в кристалле (по отношению к оптической оси) при котором происходит оптимальная генерация второй гармоники е-волны если:  $n_o(\omega) = 1.5$ ;  $n_e(\omega) = 1.45$ ;  $n_e(2\omega) = 1.49$ ;  $n_o(2\omega) = 1.53$ . Синхронизм ое-типа.
7. Рассмотреть задачу о генерации разностной гармоники в условиях точного синхронизма при коллинеарном взаимодействии плоских волн.
8. Получить выражение для отстройки  $\delta\omega$  в двух резонаторном ПГС в зависимости от параметра изменения длины резонатора  $\delta l$ .
9. Вычислить кривизну  $\rho$  луча в пучке с линейной зависимостью освещенности от координаты в поперечном сечении. Указание. Воспользоваться выражением для кривизны луча  $\rho = \frac{d}{dx}(\ln n)$ .
10. Вычислить угол  $\theta$  отклонения пучка с линейной зависимостью освещенности от координат в поперечном сечении при проходимости слоя толщиной  $\ell$ . Полагать  $\theta \ll 1$ .

11. Вычислить смещение пучка с линейной зависимостью освещенности от координаты в слое толщиной  $\ell$ .

12. Вывести формулу для поляризации для модели газа, состоящего из атомов без постоянного электрического дипольного момента в сильном постоянном электрическом поле (модель ангармонического осциллятора

$$f_y = -kr - gr^3.$$

13. Найти направление, для которого происходит синфазное сложение вторичных антистоксовых волн, излучаемых слоем рассеивающего вещества при большом усилении стоксова излучения ( $\alpha_s d \gg 1$ ) и малом радиусе пучка возбуждающего света ( $a^2 \ll \lambda d^2 \alpha_s$ ).

14. Выразить коэффициент усиления для стоксова вынужденного комбинационного рассеяния через интегральную (по частотам и углам) мощность спонтанного комбинационного рассеяния.

15. Определить критическую мощность в пучке лазерного излучения, необходимую для реализации режима самоканализации.

16. Решить систему укороченных уравнений для комплексных амплитуд в случае генерации второй гармоники

$$\frac{dA_1}{dt} = i \frac{4\pi\omega_1^2}{k_1 c^2} \chi A_2 A_1 e^{i\Delta K z}, \quad \frac{dA_2}{dz} = i \frac{8\pi\omega_1^2}{k_2 c^2} \chi A_1^2 e^{i\Delta K z}.$$

где  $\Delta K = K_2 - 2K_1 = \frac{2\omega_1}{c}(n_2 - n_1) = \frac{4\pi}{\lambda_0}(n_2 - n_1)$  для случая отсутствия синхронизма ( $\Delta K \neq 0$ ). Рассмотреть случай  $A_2 \ll A_1$ .

17. Определить резонансную часть вынужденных колебаний ядер молекулы при ее взаимодействии с полем, описываемым формулой:

$$E = A \cos(\omega t + \varphi) + A_s \cos(\omega_s t + \varphi_s).$$

а уравнение, описывающее колебание ядер, имеет вид:  $\ddot{\xi} + \Gamma \dot{\xi} + \omega_i^2 \xi = \frac{\mu}{2m} E^2$ .

где  $m$  – приведенная масса ядер,  $\Gamma$  – характеризует затухание колебаний. Резонансная составляющая силы изменяется с частотой  $\omega_i = \omega - \omega_s$ .

18. Найти решение уравнения дисперсии при наличии затухания:

$$m\ddot{r} + g\dot{r} + fr = eE_0 \sin \omega t.$$

19. Найти выражение комплексной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$ , исходя из комплексного значения для  $r$ .

20. Вычислить дипольный момент ангармонической молекулы, индуцированный монохроматическим полем  $E(t) = E_0 \cos(\omega t)$ , если потенциальная энергия описывается уравнением  $U(x) = \frac{1}{2}bx^2 - \frac{1}{3}m\beta x^3$ .

21. Вычислить дипольный момент ангармонической молекулы, индуцированный монохроматическим полем  $E(t) = A \cos(\omega t + \varphi)$ , если потенциальная энергия электрона описывается уравнением  $U(x) = \frac{1}{2}bx^2 - \frac{1}{4}m\gamma x^4$ .

22. Атомы среды могут находиться в двух состояниях с энергиями  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ . Рассмотреть распространение в такой среде света с частотой  $\omega$ , соответствующей переходу между этими уровнями ( $\hbar\omega = \varepsilon_2 - \varepsilon_1$ ). Показать, что при больших интенсивностях света коэффициент поглощения уменьшается (насыщение).

23. Показать, что в фазовой объемной голограмме, получаемой с опорной волной  $E_0 \cos(kr - \omega t)$  и плоской предметной волной  $E_1 \cos(k_1 r - \omega_1 t)$  частота которой  $\omega_1$  близка к  $\omega$ , пространственное распределение показателя преломления имеет вид  $\delta n(r, t) = b \cos(qr - \Omega t)$ , где  $q = k - k_1$  и  $\Omega = \omega - \omega_1 \ll \omega$ .

24. Показать, что в изотропной среде в области нормальной дисперсии невозможно выполнение условия пространственного синхронизма  $k_3 = k_1 + k_2$  для волн, частоты которых связаны соотношением  $\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$ .

25. Определить длину самофокусировки в случае линейной зависимости освещенности от координат в поперечном сечении пучка. Принять зависимость показателя преломления от амплитуды поля  $n = n_0 + n_2 a^2$ .

26. Вычислить мощность излучения, необходимую для самофокусировки для случая параболического изменения освещенности в поперечном сечении пучка.

$$\text{Воспользоваться соотношением: } S(r) = \frac{cn_0}{8\pi} A_0^2 \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right), \quad p = 2\pi \int_0^a S(r) r dr.$$

### Критерии и шкала оценивания по оценочному средству промежуточный контроль (экзамен)

| Шкала оценивания        | Критерий оценивания                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| отлично (5)             | Студент глубоко и в полном объёме владеет программным материалом. Грамотно, исчерпывающе и логично его излагает в устной или письменной форме. При этом знает рекомендованную литературу, проявляет творческий подход в ответах на вопросы и правильно обосновывает принятые решения, хорошо владеет умениями и навыками при выполнении практических задач. |
| хорошо (4)              | Студент знает программный материал, грамотно и по сути излагает его в устной или письменной форме, допуская незначительные неточности в утверждениях, трактовках, определениях и категориях или незначительное количество ошибок. При этом владеет необходимыми умениями и навыками при выполнении практических задач.                                      |
| удовлетворительно (3)   | Студент знает только основной программный материал, допускает неточности, недостаточно чёткие формулировки, непоследовательность в ответах, излагаемых в устной или письменной форме. При этом недостаточно владеет умениями и навыками при выполнении практических задач. Допускает до 30% ошибок в излагаемых ответах.                                    |
| неудовлетворительно (2) | Студент не знает значительной части программного материала. При этом допускает принципиальные ошибки в доказательствах, в трактовке понятий и категорий, проявляет низкую культуру знаний, не владеет основными умениями и навыками при выполнении практических задач. Студент отказывается от ответов на дополнительные вопросы                            |

## Лист изменений и дополнений

| №<br>п/п | Виды дополнений и<br>изменений | Дата и номер протокола<br>заседания кафедры (кафедр),<br>на котором были<br>рассмотрены и одобрены<br>изменения и дополнения | Подпись (с расшифровкой)<br>заведующего кафедрой<br>(заведующих кафедрами) |
|----------|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
|          |                                |                                                                                                                              |                                                                            |
|          |                                |                                                                                                                              |                                                                            |
|          |                                |                                                                                                                              |                                                                            |
|          |                                |                                                                                                                              |                                                                            |