

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
(ВлГУ)

Кафедра физики и прикладной математики

УТВЕРЖДАЮ

Проректор  
по образовательной деятельности

А.А.Панфилов

« 03 » 09 2018 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

**НЕЛИНЕЙНАЯ ОПТИКА**

(наименование дисциплины)

Направление подготовки **12.03.05 Лазерная техника и лазерные технологии**

Профиль/программа подготовки

Уровень высшего образования **бакалавриат**

Форма обучения **очная**

Семестр	Трудоемкость зач. ед./ час.	Лекции, час.	Практич. занятия, час.	Лаборат. работы, час.	СРС, час.	Форма промежуточного контроля (экз./зачет)
6	180/5	36	18	-	81	Экзамен (45)
Итого	180/5	36	18	-	81	Экзамен (45)

Владимир 20/18

## 1. ЦЕЛИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Целями освоения дисциплины (модуля) Нелинейная оптика является формирование у обучающихся понимания физических основ нелинейных оптических явлений и эффектов, получение практических навыков их расчета и моделирования для последующего использования этих знаний при разработке и оптимизации методов, средств и технологий, использующих лазерное излучение.

Задачи дисциплины:

- теоретическая подготовка в области физики нелинейных явлений, позволяющая будущим инженерам ориентироваться в потоке научной и технической информации и обеспечивающая им возможность использования новых физических принципов нелинейной оптики в областях средств исследований и лазерных технологий;
- формирование нелинейного научного мышления, в частности правильного понимания границ применимости физических понятий, законов, теорий линейной физики и умения оценивать степень достоверности результатов, полученных с помощью экспериментальных или математических методов исследования;
- выработка приемов и навыков решений конкретных задач в области физики нелинейных колебаний и волн, помогающих студентам в дальнейшем решать инженерные задачи.
- ознакомление студентов с современной научной аппаратурой и выработка у них начальных навыков проведения экспериментальных научных исследований физических явлений в области нелинейной оптики и оценки погрешностей измерений.

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОПОП ВО

Дисциплина «Нелинейная оптика» относится к обязательным дисциплинам вариативной части основной профессиональной образовательной программы. Изучение дисциплины проходит в шестом семестре.

Для успешного освоения курса физики студентам необходимо знать следующие разделы высшей математики и физики: Дифференциальное исчисление, Интегральное исчисление, Аналитическая геометрия и линейная алгебра, Ряды, Элементы векторного анализа, Функции комплексного переменного, Дифференциальные уравнения, Элементы теории вероятностей и математической статистики, Основы оптики, Когерентная оптика, Основы квантовой электроники.

Освоение дисциплины необходимо для изучения следующих дисциплин учебного плана: «Взаимодействие лазерного излучения с веществом», «Лазерная техника», «Физические и математические принципы адаптивной оптики», «Научно-исследовательская работа в семестре», выполнение выпускной квалификационной работы.

## 3. КОМПЕТЕНЦИИ ОБУЧАЮЩЕГОСЯ, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

В результате освоения дисциплины обучающийся должен демонстрировать следующие результаты образования:

- способностью к проведению измерений и исследования различных объектов по заданной методике (ПК-3);

- способностью к анализу, расчету, проектированию и конструированию в соответствии с техническим заданием типовых систем, приборов, деталей и узлов на схемотехническом и элементном уровнях, (ПК-5);

1) **Знать:** особенности проведения измерений и исследования нелинейных взаимодействий различных объектов по заданной методике; методы анализа, расчёта, проектирования и конструирования в соответствии с техническим заданием типовых оптических систем, приборов, деталей и узлов нелинейной оптики на схемотехническом и элементном уровнях

2) **Уметь:** проводить измерения и исследования нелинейных взаимодействий различных объектов по заданной методике проводить анализ, расчёт, проектирование и

конструирование в соответствии с техническим заданием типовых оптических систем, приборов, деталей и узлов нелинейной оптики на схмотехническом и элементном уровнях.

3) **Владеть:** способностью проводить измерения и исследования нелинейных взаимодействий различных объектов по заданной методике; способностью проводить анализ, расчёт, проектирование и конструирование в соответствии с техническим заданием типовых оптических систем, приборов, деталей и узлов нелинейной оптики на схмотехническом и элементном уровнях.

#### 4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Общая трудоемкость дисциплины составляет 5 зачетных единиц, 180 часа.

№ п/п	Раздел (тема) дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)						Объем учебной работы, с применением интерактивных методов (в часах / %)	Формы текущего контроля успеваемости (по неделям семестра), форма промежуточной аттестации (по семестрам)
				Лекции	Практические занятия	Лабораторные работы	Контрольные работы	СРС	КП / КР		
1	Нелинейная оптика. Введение.	6	1-2	4	2	-	-	12	-	2/33,3%	-
2	Теория нелинейно-оптических явлений.	6	3-5	6	4	-	-	18	-	3/30%	Рейтинг-контроль №1
3	Генерация второй гармоники.	6	6-11	12	6	-	-	23	-	6/33,3%	Рейтинг-контроль №2
4	Параметрическое преобразование света. ВР. ОВФ.	6	12-18	14	6	-	-	28	-	8/40%	Рейтинг-контроль №3
<b>Всего</b>		6	1-18	36	18	-	-	81	-	19/35%	экзамен (45ч.)

#### Лекции

#### Содержание разделов дисциплины

Темы, разделы дисциплины	Кол-во часов	лекции	практические	лабораторные	срс
<b>Раздел 1. Нелинейная оптика. Введение.</b>	<b>18</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>-</b>	<b>12</b>
Лекция 1. Предмет нелинейной оптики. Когерентные нелинейно-оптические эффекты	18	4	2	-	12
<b>Раздел 2. Теория нелинейно-оптических явлений.</b>	<b>30</b>	<b>8</b>	<b>4</b>	<b>-</b>	<b>18</b>
Лекция 2. Нелинейный отклик среды. Феноменологическое описание восприимчивостей	14	4	2	-	8
Лекция 3. Метод медленно меняющихся амплитуд	16	4	2	-	10
<b>Раздел 3. Генерация второй гармоники.</b>	<b>41</b>	<b>12</b>	<b>6</b>	<b>-</b>	<b>23</b>
Лекция 4. Точное решение для генерации второй гармоники	13	4	2	-	7
Лекция 5. Параметрическое усиление	14	4	2	-	8
Лекция 6. Нестационарные укороченные уравнения. Нестационарная ГВГ	14	4	2	-	8
<b>Раздел 4. Параметрическое преобразование света. Вынужденное комбинационное рассеяние света.</b>	<b>46</b>	<b>12</b>	<b>6</b>	<b>-</b>	<b>28</b>
Лекция 7. Взаимодействие волн в средах с отрицательной дисперсией	14	4	2	-	8
Лекция 8. Параметрическое преобразование при рассеянии. Рамановское рассеяние света.	16	4	2	-	10
Лекция 9. Вынужденное комбинационное рассеяние света. Обращение волнового фронта	16	4	2	-	10
<b>Экзамен (45)</b>	<b>45</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
<b>Итого</b>	<b>180</b>	<b>36</b>	<b>18</b>	<b>-</b>	<b>81</b>

### Практические занятия

№ модуля дисциплины	№ п/п	Наименование и/или краткое содержание практических занятий	Трудоёмкость (часов)
Раздел 1.	1.	Когерентные нелинейно-оптические эффекты	2
Раздел 2.	2.	Нелинейный отклик среды	2
	5.	Метод медленно меняющихся амплитуд	2
Раздел 3.	6.	Генерация второй гармоники (ГВГ)	2
	7.	Точное решение для генерации второй гармоники	
	8.	Механизм параметрического усиления	
	9.	Нестационарные укороченные уравнения	2
	10.	Нестационарная ГВГ	2
Раздел 4.	11.	Взаимодействие волн в средах с отрицательной дисперсией	2
	12.	Особенности газовых нелинейно-оптических сред.	
	13.	Параметрическое преобразование при рассеянии. Рамановское рассеяние света.	2
	14.	Антистоксовы компоненты КР	
	15.	Вынужденное комбинационное рассеяние света.	
	16.	Параметрические генераторы. Условия возбуждения.	2
	17.	Обращение волнового фронта	
	18.	Обсуждение контрольных работ	
Итого			18

### 5. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- лекционно-семинарская система обучения (традиционные лекционные и практические занятия);
- мастер-классы (демонстрация на практических занятиях принципов расчета задач по различным темам);
- применение мультимедиа технологий (проведение лекционных занятий с применением компьютерных презентаций и демонстрационных роликов с помощью проектора или компьютера);
- информационно-коммуникационные технологии (применение информационных технологий для мониторинга текущей успеваемости студентов и контроля знаний).
- Встречи с учеными и специалистами, работающими в направлении развития и использования перспективных лазерных технологий.

### 6. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ИТОГАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ И УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

Текущим контролем успеваемости является действующая в университете система рейтинг-контроля.

#### Вопросы рейтинг-контроля №1

Вариант 1.

1. Объяснить различный характер взаимодействия световых полей малой и большой интенсивности с веществом.
2. Вычислить отношение нелинейных восприимчивостей  $\chi^{(2m+1)}/\chi^{(2m-1)}$  для соседних нечетных порядков ( $m > 2$ ) как функцию параметра нелинейности, определяемого формулой  $\vec{E} = E/E_{am}$ .
3. Определить напряженность электрического поля  $E$  в лазерном пучке диаметром 1 мм и мощностью 1 кВт.

Вариант 2.

1. Каковы физические причины нелинейных оптических явлений?
2. Преобразовать формулу для критической интенсивности лазерного пучка так, чтобы с помощью нее можно было определять критическую амплитуду светового вектора в

лазерном пучке. 
$$I_{cr} = \frac{\lambda^2 k_T}{16\pi\mu_0 a^4} \cdot \left| \frac{dn}{dT} \right|^{-1}.$$

3. Оценить диаметр пятна в фокусе объектива для лазерного излучения мощностью 10 кВт, если требуется обеспечить напряженность электрического поля  $E = 3 \cdot 10^4$  В/см.

Вариант 3.

1. Каков физический смысл величины  $\chi^{(m)}$  – нелинейной восприимчивости  $m$ -го порядка?
2. Вычислить параметр нелинейности  $\bar{E} = E/E_{am}$  для излучения импульсного лазера интенсивностью  $I = 10^{14}$  Вт/м<sup>2</sup>, распространяющегося в одноатомном однородном кристалле, не являющемся магнитным материалом ( $\mu = 1$ ), с характерной напряженностью внутриатомного поля  $E_{at} = 10^{10}$  В/м и показателем преломления  $n = 1,5$ .
3. Определить плотность мощности лазерного излучения  $N$ , если напряженность электрического поля этого излучения  $E = 10^5$  В/см.

Вариант 4.

1. Каковы физические причины одновременного возникновения нескольких волн с кратными частотами в нелинейной среде?
2. Записать формулу  $P = \varepsilon_0 \chi^{(1)} E$  для анизотропного линейного оптического кристалла.
3. Определить напряженность электрического поля  $E$  в лазерном пучке диаметром 1 мм и мощностью 10 кВт.

Вариант 5.

1. Каковы физические причины одновременного возникновения нескольких волн с кратными частотами в нелинейной среде?
2. Показать, что если на среду воздействуют две плоские монохроматические волны с различными частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , то квадратичная поляризованность среды будет содержать гармонические составляющие на частотах  $2\omega_1$ ,  $2\omega_2$ ,  $\omega_1 - \omega_2$  и  $\omega_1 + \omega_2$ .
3. Оценить диаметр пятна в фокусе объектива для лазерного излучения мощностью 10 кВт, если требуется обеспечить напряженность электрического поля  $E = 1 \cdot 10^4$  В/см.

Вариант 6.

1. Каковы физические причины одновременного возникновения нескольких волн с кратными частотами в нелинейной среде?
2. Записать волновое уравнение

$$\Delta E_i = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left[ \sum_{k=1}^3 (1 + \chi_{ik}^{(1)}) E_k \right] + \mu_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left[ \sum_{k=1}^3 \sum_{j=1}^3 \chi_{ikj}^{(2)} E_k E_j + \sum_{k=1}^3 \sum_{j=1}^3 \sum_{m=1}^3 \chi_{ikjm}^{(3)} E_k E_j E_m + \dots \right];$$

а) для анизотропного линейного; б) изотропного линейного; в) кубично-нелинейного оптических кристаллов.

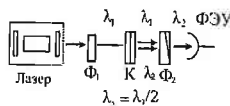
3. Определить плотность мощности лазерного излучения  $N$ , если напряженность электрического поля этого излучения  $E = 10^6$  В/см.

Вариант 7.

1. Объяснить сущность некогерентных нелинейных эффектов в оптике.
2. Показать, почему наибольший вклад в нелинейные оптические процессы будут давать низшие члены в разложении  $P(E) = \varepsilon_0 [\chi^{(1)} E + \chi^{(2)} E^2 + \dots + \chi^{(m)} E^m + \dots]$ .
3. Оценить диаметр пятна в фокусе объектива для лазерного излучения мощностью 1 кВт, если требуется обеспечить напряженность электрического поля  $E = 1 \cdot 10^4$  В/см.

Вариант 8.

1. Пояснить схему опыта П. Франкена по наблюдению генерации второй гармоники.



2. Получить волновое уравнение для среды с нелинейной поляризованностью, записанное для магнитной составляющей электромагнитного поля.
3. Оценить интенсивность лазерного излучения, когда поле  $E$  в пучке становится сопоставимым с внутриатомным и разложение поляризации  $P$  по степеням поля  $E$  теряет смысл. ( $3.5 \cdot 10^{16}$  Вт/см<sup>2</sup>).

Вариант 9.

1. В чем состоит физический смысл волнового (фазового) синхронизма?
2. Записать формулу  $P = \epsilon_0 \chi^{(1)} E$  для анизотропного линейного оптического кристалла.
3. Оценить плотность потока энергии  $I$  лазерного излучения, при которой происходит электрический пробой сухого очищенного от пыли воздуха. Какая при этом амплитуда напряженности электрического поля  $E_0$ ? Какой мощности  $P$  лазера это соответствует, если лазерный луч имеет диаметр  $d = 0.3$  мм? Длина волны излучения  $\lambda = 10.6$  мкм (СО2-лазер), длительность импульса  $t_{\text{имп}} = 1$  мкс, ионизация в сухом воздухе происходит при энергии электронов  $U = 12$  эВ, длина свободного пробега электронов  $l = 3 \cdot 10^{-4}$  см.

Вариант 10.

1. В чем заключается полуклассический подход при рассмотрении взаимодействия электромагнитного излучения с веществом?
2. Дать математическую запись условий того, что некоторая оптическая среда является слабопоглощающей и слабонелинейной.
3. Определить тензор квадратичной восприимчивости  $\chi^{(2)}$  у кристалла KDP, обладающего симметрией 42m (тетрагональная сингония) для  $\lambda = 1.064$  мкм. ( $d_{36} = (1.1 \pm 0.3) \cdot 10^{-9}$  СГСЭ,  $d_{14} = (0.95 \pm 0.06) d_{36}$ ).

Вариант 11.

1. Объяснить, как влияет симметрия оптического кристалла на его нелинейную поляризацию.
2. Закон дисперсии нелинейных восприимчивостей и чем она обусловлена?
3. Определить вид тензора линейной восприимчивости  $c_{ij}$ , если поляризация  $P$  ( $P_i = c_{ij} E_j$ ) ориентирована параллельно электрическому полю  $E$ .

Вариант 12.

1. Пояснить, почему в кварцевых стеклах, применяемых в оптических световодах, не могут иметь место нелинейные эффекты второго порядка.
2. Каков физический смысл величины  $\chi^{(m)}$  – нелинейной восприимчивости  $m$ -го порядка?
3. Тензор диэлектрической проницаемости для кристалла имеет вид

$$\begin{pmatrix} 3 & 1 & 0 \\ 1 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 4 \end{pmatrix} \text{ Приведите этот тензор к главным осям.}$$

## Вопросы рейтинг-контроля №2

Вариант 1.

1. Пояснить границы применимости линейной модели Друде – Лоренца взаимодействия излучения с веществом.
2. Объяснить, почему для прозрачной (непоглощающей) оптической среды  $\text{Im } \chi^{(1)} = 0$ .
3. Каков физический смысл просветления поглощающей среды?
4. Считая известной естественную ширину возбужденного атомного уровня  $\gamma_0$ , оценить неопределенность  $\delta l$  длины волны фотона, излучаемого при переходе электрона с данного энергетического уровня на уровень с меньшей энергией.

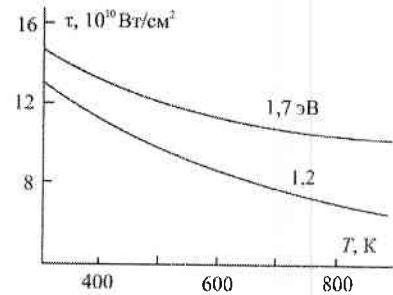
Вариант 2.

1. Объяснить физический смысл членов в уравнении движения вынужденных затухающих колебаний одного осциллятора.

2. . Какова связь между нелинейными поляризованностями смежных порядков  $P^{(n)}$ ,  $P^{(n+1)}$  и параметром нелинейности  $\bar{E} = E/E_{ат}$ .

3. Каков физический смысл эффективного сечения многофотонного процесса  $\sigma(k)$  и от каких параметров он зависит?

4. Дать физическое объяснение характера зависимостей, представленных на рис.



Вариант 3.

1. Получить зависимость линейной восприимчивости  $\chi^{(1)}(\omega)$  от частоты для среды, в которой колебания оптических электронов являются гармоническими, и имеется только одна резонансная частота. Изобразить эту зависимость графически.

2. Дать характеристику модели ангармонического осциллятора с кубической нелинейностью в рамках модели ангармонического осциллятора? ( $K_2 = 0$ ) -уравнение Дуффинга. Какой процесс оно описывает?

3. Пояснить, почему для двухфотонного фотоэффекта величина силы тока в фотоэлементе пропорциональна квадрату мощности лазерного излучения, падающего на катод фотоэлемента.

4. В чем состоит эффект Штарка?

Вариант 4.

1. Какую новую информацию позволяют получить модели ангармонических осцилляторов по сравнению с линейной моделью?

2. Обосновать необходимость квантовой модели взаимодействия излучения с веществом.

3. Почему в оптическом кристалле имеет место резкий рост вероятности многофотонных процессов при увеличении интенсивности падающего лазерного излучения?

4. Имеются два импульсных лазера, излучающих на одной частоте, но с различными длительностями импульсов: соответственно  $\tau_1 = 1$  нс и  $\tau_2 = 10^{-3}$  нс. Какой из них и почему предпочтительнее для использования в оптоволоконных линиях с точки зрения обеспечения стойкости к оптическому пробое?

Вариант 5.

1. Показать, что в нелинейных средах нарушается принцип неизменности частоты света при переходе из одной среды в другую.

2. Доказать, что в рамках квантовой модели взаимодействие интенсивного светового поля с веществом представляет собой нелинейный процесс.

3. Чем отличается процесс двухфотонного перехода от процесса, представляющего собой два последовательных однофотонных перехода?

4. Сравнить время жизни атома в виртуальном состоянии с временем жизни в реальном возбужденном состоянии при двухфотонном переходе.

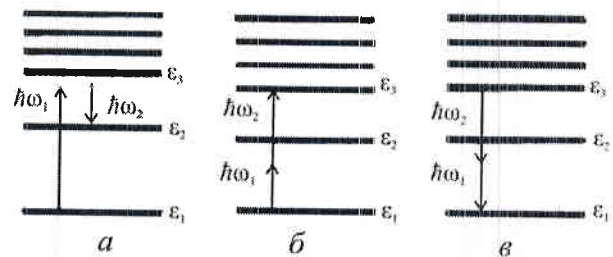
Вариант 6.

1. На основе формулы  $\chi(\omega) = \chi^{(1)}(\omega) + \chi^{(3)}(\omega)E_m^2$  получить зависимость показателя преломления оптической среды от интенсивности падающего излучения.

2. В чем состоят физические особенности задачи о резонансном взаимодействии двухуровневой квантовой системы с

монохроматическим излучением, обычно выражаемые понятием «атом, одетый полем»?

3. Записать закон сохранения энергии для двухфотонных процессов, показанных на рис.



4. Доказать, что оптический пробой является нелинейным процессом.

Вариант 7.

1. Какие физические результаты позволяет получить модель бигармонического возбуждения осциллятора с квадратичной нелинейностью?
2. В чем состоит принципиальное отличие между слабым и сильным внешним полем в задаче о резонансном взаимодействии двухуровневой квантовой системы с монохроматическим излучением?
3. Какова связь между эффектами генерации высших гармоник и многофотонными процессами?
4. Как и почему пороговая мощность оптического пробоя зависит от длительности импульса излучения?

Вариант 8.

1. В чем состоит правило Р. Миллера и к каким практическим выводам оно приводит?
2. Привести примеры нелинейных оптических явлений, обусловленных наличием градиентов термодинамических величин.
3. Объяснить, почему ни при каком обычном (не лазерном) источнике света многофотонные процессы в оптических кристаллах не наблюдаются.
4. Получить математическое выражение закона Бугера для нелинейного поглощения.

Вариант 9.

1. Дать физическое объяснение тому, что в формулу  $\chi^{(3)} = \frac{3}{4} \chi^{(1)}(\omega) \delta \frac{(e/m)^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^3}$  для кубичной восприимчивости  $\chi^{(3)}$  не входит квадратичная восприимчивость  $\chi^{(2)}$ .
2. В чем сходство и различие между однофотонными и многофотонными процессами?
3. Используя фундаментальные закономерности квантовой физики, объяснить физическую природу промежуточных состояний, через которые проходит атомный электрон при многофотонном процессе.

Вариант 10.

1. Получить зависимость линейной восприимчивости  $\chi^{(1)}(\omega)$  от частоты для среды, в которой колебания оптических электронов являются гармоническими, и имеется только одна резонансная частота.
2. Могут ли быть одни двухфотонные процессы линейными, а другие – нелинейными? Ответ пояснить на примерах.
3. При каких допущениях справедливо выражение для вероятности многофотонного перехода  $w^{(k)} = \prod_i w^{(i)} = [w^{(1)}]^k \approx I^k$ ? Почему в ряде случаев строгая степенная зависимость нарушается?

4. Объяснить, почему нелинейное поглощение на несколько порядков величины больше линейного поглощения.

### Вопросы рейтинг-контроля №3

Вариант 1.

1. Показать, что выражение  $n(\omega, E) = n(\omega) + n_{\text{нл}} E^2$  для показателя преломления нелинейной среды получается как результат вклада кубичной восприимчивости  $\chi^{(3)}$ .
2. Пояснить работу ВКР-лазеров и ВКР-усилителей.
3. Показать, что дисперсия групповых скоростей имеет место и для линейных, и для нелинейных волн.
4. Каковы основные свойства солитонов?

Вариант 2.

1. Объяснить, почему в выражении для  $n_{\text{нл}} E^2 = n_2 I + n_4 I^2 + \dots$  для нелинейной части показателя преломления присутствуют только четные степени амплитуды светового вектора.
2. В чем отличие спонтанного от вынужденного рассеяния Манделъштама – Бриллюэна?
3. Дать характеристику уравнения Кортевега – де Фриза.
4. Объяснить, почему групповой солитон не может содержать слишком большое (более 20) количество волн.

Вариант 3.



1. Как влияет знак рефракционного индекса на характер эволюции светового пучка в оптической среде?
2. Почему явление вынужденного рассеяния Манделъштама – Бриллюэна аналогично явлению дифракции на пространственной решетке?
3. Сравнить структуру уравнения Кортевега – де Фриза и нелинейного уравнения Шредингера и физический смысл членов в этих уравнениях.
4. Сравнить свойства параметрического усиления со свойствами ВКР-усиления и ВРМБ-усиления.

Вариант 4.

1. Пояснить, в чем состоит нелинейный характер явления самофокусировки светового пучка.
2. Доказать, что при вынужденном рассеянии Манделъштама – Бриллюэна волна накачки и волна рассеянного излучения распространяются в противоположных направлениях.
3. Что характеризуют дисперсионные коэффициенты  $\beta_1$  и  $\beta_2$  в обобщенном уравнении являющимся обобщением уравнения КдФ и нелинейного уравнения Шредингера?
4. Почему четырехволновое смешение является одним из самых нежелательных нелинейных оптических эффектов в оптоволоконных системах передачи информации?

Вариант 5.

1. Привести математическую формулу, доказывающую, что при фазовой самомодуляции форма оптических импульсов не изменяется.
2. В чем состоит полезное и вредное влияние вынужденного рассеяния Манделъштама – Бриллюэна для оптоволоконных линий связи?
3. Проверить с точки зрения размерности физических величин, что правые части формул для дисперсионной длины и нелинейной длины дают характерные длины (дисперсионная длина и нелинейная длина).
4. Для чего в волоконных линиях передачи информации применяется сжатие оптических импульсов? До каких величин сжимаются импульсы?

Вариант 6.

1. Какова связь между явлениями самофокусировки и фазовой самомодуляции?
2. Построить качественно графическую зависимость для спектра ВРМБ усиления.
3. В чем состоит математическое и физическое содержание понятия «модуляционная неустойчивость»?
4. Доказать, что образование оптического солитона – это нелинейный физический процесс.

Вариант 7.

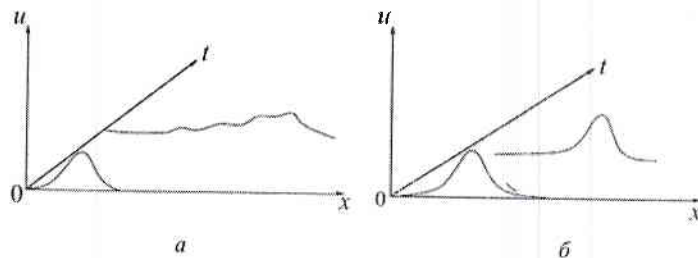
1. Почему при малой величине кубичной восприимчивости  $\chi^{(3)}$  кварцевого стекла нелинейные эффекты тем не менее играют существенную роль в оптоволоконных линиях передачи информации?
2. Сравнить пороговые мощности для вынужденного комбинационного рассеяния и вынужденного рассеяния Манделъштама – Бриллюэна.
3. Объяснить, почему групповой солитон не может содержать слишком большое (более 20) количество волн.
4. Как можно использовать солитоны в оптоволоконных линиях связи?

Вариант 8.

1. Пояснить физический смысл членов в уравнении для нелинейного набега фазы для светового импульса.
2. Каковы методы противодействия негативному влиянию вынужденного комбинационного рассеяния и вынужденного рассеяния Манделъштама – Бриллюэна в оптоволоконных линиях связи?
3. Как влияют оптические потери в волокне на модуляционную неустойчивость при распространении лазерных импульсов?
4. Пояснить значение понятия «период солитона».

Вариант 9.

1. Объяснить, почему фазовая самомодуляция приводит к частотной модуляции оптических импульсов.
2. Доказать, что максимальный коэффициент ВРМБ-усиления имеет место при совпадении частоты накачки и бриллюэновского частотного сдвига.
3. Чем объясняется различный характер эволюции волнового пакета на рис. а и б?
4. Сравнить свойства фундаментального солитона и оптических солитонов высших порядков.



Вариант 10.

1. Доказать, что явления вынужденного комбинационного рассеяния и вынужденного рассеяния Мандельштама – Бриллюэна накладывают ограничения на максимальную мощность оптических импульсов, используемых в оптоволоконных линиях передачи информации.
2. Показать, что линейная комбинация двух решений волнового уравнения для электрической составляющей также является решением этого уравнения.
3. Сравнить структуру уравнения Кортевега – де Фриза и нелинейного уравнения Шредингера, и физический смысл членов в этих уравнениях.
4. Пояснить условия, необходимые для формирования оптических солитонов.

**Промежуточная аттестация** проходит в форме экзамена.

Вопросы к экзамену

1. История и предмет нелинейной оптики
2. Классификация нелинейно-оптических эффектов
3. Когерентные и не когерентные нелинейно-оптические эффекты
4. Нелинейное поглощение света
5. Генерация суммарных и разностных частот
6. Параметрическая генерация
7. Вынужденное рассеяние
8. Уравнения Максвелла – Лоренца в среде
9. Нелинейный отклик среды Разложение поляризации по степеням поля
10. Нелинейная поляризация
11. Генерация второй гармоники (интегральный подход)
12. Феноменологическое описание оптических восприимчивостей кристаллических сред
13. Тензоры оптических восприимчивостей Перестановочные соотношения. Свойства симметрии оптических сред
14. Метод медленно меняющихся амплитуд для среды с квадратичной нелинейностью (трехфотонные взаимодействия)
15. Система стационарных укороченных уравнений. Приближение заданного поля. Соотношения Мэнли – Роу.
16. Генерация второй гармоники (ГВГ) в приближении заданного поля
17. Фазовый синхронизм и методы его реализации. Виды фазового синхронизма.
18. Генерация суммарных и разностных частот. Прикладные аспекты
19. Уравнения для медленно меняющихся действительных амплитуд и фаз.
20. Точное решение для генерации второй гармоники. Захват фазы.
21. Параметрический генератор света (ПГС). Параметрическое усиление. Коэффициенты усиления параметрического усилителя.
22. Параметрический генератор. Перестройка частоты. Однорезонаторный и двухрезонаторный ПГС. Параметрический генератор встречной волны.
23. Метод медленно меняющихся амплитуд в теории распространения волновых пакетов. Нестационарные укороченные уравнения.

24. Второе приближение теории дисперсии. Уравнения для пучков и импульсов.
25. Дифракционные эффекты. Дисперсионное расплывание импульсов. Общее уравнение для модулированных в пространстве и во времени амплитуд.
26. Трехфотонные процессы. Система нелинейных нестационарных уравнений.
27. Нестационарная ГВГ. Эффект группового запаздывания импульсов.
28. Групповой синхронизм. Эффект дисперсионного расплывания импульсов.
29. Особенности газовых атомных и молекулярных нелинейно-оптических сред. Четырехфотонные взаимодействия.
30. Укороченные уравнения. Резонансные четырех фотонные процессы.
31. Оценка, расчет и интерпретация нелинейных восприимчивостей.
32. Взаимодействие волн в средах с отрицательной дисперсией.
33. Насыщение резонансного перехода. Динамический эффект Штарка.
34. Параметрическое просветление. Высокочастотный эффект Керра.
35. Условия фазового согласования и методы его реализации.
36. Комбинационное (Рамановское) рассеяние света.
37. Вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР).
38. Физический механизм рассеяния. Основные уравнения и параметры. Порог ВКР.
39. Вынужденное рассеяние Мандельштама – Бриллюэна.
40. Обращение волнового фронта. Комбинационные лазеры.

**Самостоятельная работа** студентов включает в себя:

1. Аудиторная самостоятельная работа студента по дисциплине выполняется на практических занятиях при решении задач.

2. Внеаудиторная самостоятельная работа выполняется студентом при углубленном изучении дисциплины по теме пройденной лекции, при подготовке к практическим занятиям. Основной формой самостоятельной работы студента является изучение конспекта лекций, рекомендованной литературы и решения конкретных задач.

Самостоятельная работа завершает задачи всех других видов учебного процесса и может осуществляться на лекциях, семинарах, практических занятиях, консультациях. Как форма организации учебного процесса самостоятельная работа студентов представляет собой целенаправленную систематическую деятельность по приобретению знаний, осуществляемую вне аудитории.

Контроль выполнения самостоятельной работы осуществляется в ходе выполнения и защиты лабораторных работ по дисциплине, при выполнении практических заданий, на экзамене.

#### Вопросы для контроля самостоятельной работы

1. Определите, что называют когерентными, а что некогерентными нелинейно-оптическими эффектами?
2. Каковы физические величины, определяющие нелинейно-оптические эффекты?
3. Какова по порядку величины напряженность внутриатомного поля?
4. Каковы условия, определяющие эффективность генерации второй гармоники?
5. Каковы области применения параметрической генерации света?
6. Назовите эффекты, обусловленные второй и третьей степенью нелинейности (вторым и третьим членом разложения поляризации по полю).
7. Какова физическая величина, определяющая пространственное накопление нелинейного эффекта?
8. Назовите последовательность этапов в процессе генерации второй гармоники.
9. Что такое волновая расстройка? Сформулируйте условие фазового синхронизма.
10. В каких средах может выполняться условие фазового синхронизма?
11. Что понимают под нелинейным откликом среды? Дайте классификацию нелинейно-оптических эффектов.
12. Укажите возможные типы поляризации и время их установления. Приведите примеры одноосных и двуосных кристаллов.

13. Каково максимальное число независимых компонент квадратичного тензора оптической восприимчивости?
14. По какой схеме осуществляются трехфотонные процессы?
15. Сформулируйте условия, при которых компоненты тензора нелинейной восприимчивости симметричны относительно перестановки всех трех индексов. В чем суть соотношений Клейнмана?
16. Каковы свойства сред, в которых не может существовать квадратичная поляризация?
17. Каков характер изменения комплексной амплитуды в стационарном режиме и каких условий можно использовать метод медленно меняющихся амплитуд?
18. Что означает приближение заданного поля и каковы условия его использования?
19. Сформулируйте условия самовозбуждения.
20. Как зависит показатель преломления необыкновенной волны от угла между направлением лазерного излучения и оптической осью кристалла?
21. Каков вид индикатрис показателя преломления для обыкновенной и необыкновенной волн? В чем суть явления двойного лучепреломления?
22. Укажите виды взаимодействий, соответствующие фазовому синхронизму первого типа и второго типа.
23. Каковы виды синхронизма в положительных и отрицательных кристаллах?
24. Какова ориентация волновых векторов взаимодействующих световых волн при векторном синхронизме? Что называют углом синхронизма и направлением синхронизма?
25. Что называют  $eo-o$ ;  $ee-o$ ;  $oo-e$  -взаимодействиями?
26. Каким выражением определяется длина нелинейного взаимодействия и каково условие выполнения точного решения в отсутствии фазового синхронизма?
27. Возможна ли полная перекачка энергии во вторую гармонику на длине нелинейного взаимодействия и каковы условия необратимости процесса генерации?
28. Что называют захватом фаз? Каковы условия необходимые для захвата фаз и срыва захвата фаз? Каково изменение фазы в результате срыва фазы?
29. Какова последовательность процессов при генерации второй гармоники, сопровождающейся захватом фаз?
30. Какое значение обобщенной фазы соответствует процессу перекачки энергии из второй гармоники в первую и из первой гармоники во вторую?
31. Что называют параметрическим усилением света? На какие составляющие распадается волна накачки при параметрической генерации света? Что называют обратной длиной?
32. Каковы внешние воздействия, с помощью которых осуществляется плавная перестройка частоты в полупроводниковых оптических генераторах света?
33. С помощью какого устройства осуществляется плавная перестройка частоты в лазерах на красителях?
34. Что называют сигнальной волной, а что называют холостой волной? Каким образом усилитель может быть превращен в генератор? Каково условие самовозбуждения при параметрической генерации света?
35. Каковы условия применимости метода медленно меняющихся амплитуд в физике волновых процессов? В каком случае отклик среды считается локальным?
36. Распространение каких волн в среде описывается нестационарными укороченными уравнениями? Для описания каких оптических процессов используются уравнения параболического типа?
37. Что называют дисперсионным расплыванием? В чем суть квазиоптического приближения?
38. Каков режим генерации второй гармоники при использовании сверхкоротких лазерных импульсов?
39. В чем суть эффекта группового запаздывания импульсов? Какой вид имеет выражение для расстройки групповых скоростей импульсов? Групповой синхронизм?

40. Какие среды называют леворукими? Как направлены друг относительно друга волновой вектор и вектор Пойтинга в леворуких средах? Как ориентированы друг относительно друга фазовая и групповая скорости в леворуких средах?

41. При выполнении какого условия возможны четырехфотонные процессы? При каких условиях возможно нелинейно-оптическое смещение частот и какой вид имеет коэффициент нелинейной связи при четырехфотонных процессах?

42. Каковы особенности газовых нелинейно-оптических сред?

43. Что называют параметрическим просветлением? Каковы параметры, определяющие количество рожденных фотонов при генерации третьей гармоники вблизи резонанса?

44. В каком эффекте проявляется нелинейная интерференция атомных переходов? Какой эффект обуславливает сдвиг двухфотонного резонанса?

45. Какова эффективность преобразования в процессах третьего порядка и какие процессы могут нарушить условие фазового синхронизма в газах?

46. Какие параметры определяют порог вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) и от каких параметров среды зависят частоты спонтанного комбинационного рассеяния?

47. Что называют стоксовой компонентой излучения? Как направлено стоксово излучение при ВКР? От чего зависит фаза молекулярных колебаний при ВКР?

48. Какие приближения используются при выводе уравнений генерации вынужденного комбинационного рассеяния? Какие параметры входят в укороченные уравнения, описывающие ВКР? Условие прекращения роста амплитуды стоксовой компоненты.

49. Каким выражением описывается амплитуда антистоксовой компоненты? Какой эффект обуславливает вынужденное антистоксово комбинационное рассеяние?

## 7. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

### *а) основная литература:*

1. Кившарь Ю.С., Нелинейности в периодических структурах и метаматериалах [Электронный ресурс] / Под ред. проф. Ю.С. Кившаря, проф. Н.Н. Розанова - М. : ФИЗМАТЛИТ, 2015. - 384 с. - ISBN 978-5-9221-1593-3 - Режим доступа: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785922115933.html>

2. Аракелян С.М., Введение в фемтонофотонику: фундаментальные основы и лазерные методы управляемого получения и диагностики наноструктурированных материалов [Электронный ресурс]: учебное пособие / С.М. Аракелян, А.О. Кучерик, В.Г. Прокошев, В.Г. Рау, А.Г. Сергеев; под общ. ред. С.М. Аракеляна - М. : Логос, 2017. - 744 с. - ISBN 978-5-98704-812-2 - Режим доступа: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785987048122.html>

3. Оптика в ключевых задачах / Паршаков А.Н. - Долгопрудный: Интеллект, 2016. - 256 с.: ISBN 978-5-91559-212-3 - Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/553175>

### *б) дополнительная литература:*

1. Розанов, Н.Н. Нелинейная оптика. Часть I. Уравнения распространения излучения и нелинейный отклик среды [Электронный ресурс]: учебное пособие. - Электрон. дан. - Спб.: НИУ ИТМО (Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики), 2008. - 100 с.

2. Ахромеева, Т. С. Структуры и хаос в нелинейных средах [Электронный ресурс] / Т. С. Ахромеева и др. - М. : ФИЗМАТЛИТ, 2007. - 488 с. - ISBN 978-5-9221-0887-4.

3. Нелинейные волновые уравнения в оптике/Корель И.И. - Новосибир.: НГПУ, 2010. - 40 с.: ISBN 978-5-7782-1334-0

### *в) периодические издания*

1. Квантовая электроника: <http://www.quantum-electron.ru>
2. Успехи физических наук: <http://ufn.ru>
3. Журнал технической физики и Письма в ЖТФ: <http://journals.ioffe.ru/>

*в) интернет-ресурсы*

1. <http://www.laser.ru>
2. <http://www.cislaser.com>
3. <https://www.comsol.ru/events/>

## **8. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)**

Преподавание дисциплины предусматривает применение мультимедийных презентаций и компьютерных симуляций, что обеспечивается проведением занятий в оборудованных мультимедийным оборудованием аудиториях кафедры ФиПМ. Для обеспечения проведения практических работ имеются компьютерные классы кафедры ФиПМ.

Аудитории для проведения занятий оснащены современными персональными компьютерами, объединёнными в локальную вычислительную сеть и укомплектованными необходимым системным и прикладным программным обеспечением.

Рабочая программа дисциплины составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению 12.03.05 Лазерная техника и лазерные технологии.

Рабочую программу составил профессор кафедры ФиПИМ О.Я. Бутковский  
(ФИО, подпись)

Рецензент

(представитель работодателя)

директор НЦИКО-2 ФКП "ГАП Радра"  
(место работы, должность, ФИО, подпись)

Программа рассмотрена и одобрена на заседании кафедры ФиПИМ

Протокол № 1 от 03.09.18 года

Заведующий кафедрой

С.М. Аракелян

(ФИО, подпись)

Рабочая программа рассмотрена и одобрена на заседании учебно-методической комиссии направления 12.03.05 Лазерная техника и лазерные технологии.

Протокол № 1 от 03.09.18 года

Председатель комиссии

С.М. Аракелян

(ФИО, подпись)

### ЛИСТ ПЕРЕУТВЕРЖДЕНИЯ РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЫ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Рабочая программа одобрена на \_\_\_\_\_ учебный год

Протокол заседания кафедры № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ года

Заведующий кафедрой

С.М. Аракелян

Рабочая программа одобрена на \_\_\_\_\_ учебный год

Протокол заседания кафедры № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ года

Заведующий кафедрой

С.М. Аракелян

Рабочая программа одобрена на \_\_\_\_\_ учебный год

Протокол заседания кафедры № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ года

Заведующий кафедрой

С.М. Аракелян