

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор физтех-школы физики  
и исследований им. Ландау  
А.В. Рогачев**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Нелинейная оптика
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра проблем инерционного термоядерного синтеза
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

- 1 (осенний) - Дифференцированный зачет
- 2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 90 всего, в том числе:

- лекции: 30 час.
- семинары: 60 час.
- лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 105 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 225, всего зач. ед.: 5

Программу составил: О.О. Шаров, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры проблем инерционного термоядерного синтеза 04.04.2022

## Аннотация

Дисциплина имеет дело с основными понятиями и идеями нелинейной оптики, основными механизмами возникновения нелинейно-оптических явлений, их роли в современной лазерной физике и практическим применениям в технике физического эксперимента и серийно выпускаемых лазерных устройствах. Центральное место занимают те разделы нелинейной оптики, которые активно разрабатываются в РФЯЦ-ВНИИЭФ.

Рассмотрены вопросы нелинейной поляризованности диэлектрика, понятие фазового (волнового) синхронизма при нелинейно-оптическом взаимодействии, волновое уравнение для нелинейной среды, выводы укороченных уравнений для генерации второй гармоники в приближении медленно меняющихся амплитуд, приближение заданного поля, генерация второй гармоники в расходящемся световом пучке и световыми импульсами. Рассмотрены схемы внерезонаторной и внутрирезонаторной генерации второй гармоники, параметрическая генерация света. Даются основные представления о самовоздействии света, многофотонных процессах, оптическом пробое. Достаточно подробно рассматриваются вынужденное рассеяние света, трех и четырехволновое взаимодействие световых волн, явление обращения волнового фронта.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

Целью курса является формирование базовых знаний в области нелинейной оптики.

### Задачи дисциплины

Изучение механизмов возникновения нелинейно-оптических явлений, их роли в современной лазерной физике, их практическим применениям в технике физического эксперимента и серийно выпускаемых лазерных устройствах. Применение полученных знаний для экспериментальных исследований в РФЯЦ-ВНИИЭФ.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования

ОПК-5 Способен и готов к повышению квалификации, профессиональному росту и руководству коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия	ОПК-5.1 Способен работать в коллективе, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия
	ОПК-5.2 Владеет навыком руководства малым коллективом в сфере своей профессиональной деятельности
	ОПК-5.3 Стремится к получению новых знаний, профессиональному и личностному росту
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)
	ПК-3.2 Способен проводить эксперимент (моделирование) с использованием исследовательского оборудования (пакетов прикладных программ)
	ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- способы приближенных расчетов порогов возникновения таких нелинейных процессов, как генерация гармоник, параметрическое усиление, вынужденные рассеяния, самофокусировка и самодефокусировка света, оптический пробой;
- иметь представление о нелинейной поляризуемости вещества, нелинейных восприимчивостей и фазового синхронизма для различных нелинейно-оптических процессов.

уметь:

- проводить экспериментальные исследования нелинейно-оптических процессов.

владеть:

- методологией выбора адекватных методов исследования;
- навыками самостоятельной работы в лаборатории и Интернете;
- культурой постановки и моделирования физических задач;
- основными навыками представления своих результатов на семинарах, конференциях;
- навыками освоения большого объема информации, включая работу с научной литературой;
- основными навыками написания научных статей.
- математическим моделированием физических задач.
- практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач;
- экспериментальными и теоретическими методами исследования нелинейно-оптических процессов.

### 4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

#### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.
--	---

№	Тема (раздел) дисциплины	Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Нелинейная поляризованность диэлектрика.	5	10		7
2	Генерация второй гармоники.	5	10		33
3	Параметрическая генерация света.	5	10		5
4	Вынужденное рассеяние света.	5	10		9
5	Эффект обращения волнового фронта.	5	10		9
6	Самовоздействие света.	5	10		42
Итого часов		30	60		105
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		225 час., 5 зач.ед.			

#### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

##### Семестр: 1 (Осенний)

###### 1. Нелинейная поляризованность диэлектрика.

Волновое уравнение, плоские и гауссовы волны. Распространение волн, показатель преломления. Поляризуемость и восприимчивость среды. Нелинейная восприимчивость. Нелинейное материальное уравнение. Нелинейно-оптическое взаимодействие. Явления, связанные с квадратичной восприимчивостью. Явления, связанные с кубической восприимчивостью. Принцип фазового синхронизма. Преобразование энергии в нелинейных процессах. Соотношение Мэнли – Роу. Волновое уравнение для нелинейной среды. Приближение медленно меняющихся амплитуд и приближение заданного поля. Укороченные уравнения.

###### 2. Генерация второй гармоники.

Распространение света в одноосных кристаллах. Фазовый синхронизм при генерации второй гармоники (ГВГ). ГВГ в расходящемся световом пучке. ГВГ световыми импульсами. Диафрагменный апертурный эффект. Оптические схемы внерезонаторной ГВГ. Оптические схемы внутрирезонаторной ГВГ. Практическая реализация ГВГ.

###### 3. Параметрическая генерация света.

Трехчастотное параметрическое взаимодействие световых волн в квадратично-нелинейной среде. Фазовый синхронизм при трехчастотном параметрическом взаимодействии. Параметрическая люминесценция. Параметрическое усиление. Параметрический генератор света (ПГС).

##### Семестр: 2 (Весенний)

###### 4. Вынужденное рассеяние света.

Рассеяние света. Вынужденные аналоги. Вынужденное комбинационное рассеяние. Вынужденное рассеяние Мандельштам-Бриллюэна (ВРМБ). Фазовый синхронизм при вынужденных рассеяниях. Комбинационные лазеры и комбинационные усилители.

###### 5. Эффект обращения волнового фронта.

Механизм обращения волнового фронта (ОВФ) при вынужденных рассеяниях. ОВФ при ВРМБ. Условия дискриминации необращенных волн. Экспериментальные схемы измерения качества ОВФ. Применение эффекта обращения волнового фронта. ОВФ слабых пучков при ВРМБ. ОВФ неполяризованного излучения. Обращения волнового фронта при генерации разностной частоты и при четырехволновом взаимодействии.

#### 6. Самовоздействие света.

Самофокусировка и каналирование лазерного излучения. Тепловая дефокусировка. Многофотонное поглощение и многофотонная ионизация. Оптический пробой. Лучевая прочность оптических материалов.

### 5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Учебная аудитория, оснащенная компьютером и мультимедийным оборудованием (проектор, звуковая система).

### 6. Перечень рекомендуемой литературы

#### Основная литература

1. Прикладная нелинейная оптика, В.Г.Дмитриев, Л.В.Тарасов, “Физматлит”, Москва, 2004, 512 с.
2. Прикладная нелинейная оптика, Ф.Цернике, Дж.Мидвинтер, “Мир”, Москва, 1976.
3. Нелинейно-оптические кристаллы, Справочник, Г.Г.Гурздян, В.Г.Дмитриев, Д.Н.Никогосян, “Радио и связь”, Москва, 1991г.

#### Дополнительная литература

1. Обращение волнового фронта при вынужденном рассеянии света, В.В.Рагульский, “Наука”, 1990.
2. Обращение волнового фронта, Зельдович Б.Я., Пилипецкий Н.Ф., Шкунов В.В., “Наука”, Москва, 1985.
3. Нелинейная оптика и адаптивные лазерные системы, В.И.Беспалов, Г.А.Пасманик, М.- Наука, 134 с., 1986.
4. Лазерная искра и распространение разрядов, Ю.П.Райзер, “Наука”, Москва, 1974
5. Основы оптики, М.Борн, Э.Вольф, «Наука», Москва, 1970, 855 с.

### 7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

1. <http://lib.mipt.ru/catalogue/> – электронная библиотека Физтеха.
2. <http://www.edu.ru> – федеральный портал «Российское образование».
3. <http://benran.ru> –библиотека по естественным наукам Российской академии наук.
4. <http://www.i-exam.ru> – единый портал Интернет-тестирования в сфере образования.
5. <http://ufn.ru/> «Успехи физических наук» обзоры по актуальным физическим проблемам.

### 8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

Skype, Zoom

### 9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

Студент, изучающий дисциплину, должен, с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике.

В результате изучения дисциплины студент должен знать основные понятия и подходы к нелинейной оптике, знать основные модели и их недостатки и достоинства, применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;
- напряжённой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к выполнению заданий текущей и промежуточной аттестации.

Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями преподавателю.

Промежуточный контроль знаний проводится в 9 семестре в виде дифференцированного зачета, на котором студенту предлагается письменно ответить на теоретический вопрос, решить одну задачу и ответить на вопросы по теме курса. В 10 семестре контроль знаний проводится в виде экзамена, где студенту предлагается письменно ответить на 2 вопроса по теории и практике, решить одну задачу и ответить на вопросы по теме курса.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра проблем инерционного термоядерного синтеза
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

- 1 (осенний) - Дифференцированный зачет
- 2 (весенний) - Экзамен

**Разработчик:** О.О. Шаров, канд. физ.-мат. наук

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования
ОПК-5 Способен и готов к повышению квалификации, профессиональному росту и руководству коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия	ОПК-5.1 Способен работать в коллективе, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия
	ОПК-5.2 Владеет навыком руководства малым коллективом в сфере своей профессиональной деятельности
	ОПК-5.3 Стремится к получению новых знаний, профессиональному и личностному росту
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)
	ПК-3.2 Способен проводить эксперимент (моделирование) с использованием исследовательского оборудования (пакетов прикладных программ)
	ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов



## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Нелинейная оптика» обучающийся должен:

### знать:

- способы приближенных расчетов порогов возникновения таких нелинейных процессов, как генерация гармоник, параметрическое усиление, вынужденные рассеяния, самофокусировка и самодефокусировка света, оптический пробой;
- иметь представление о нелинейной поляризуемости вещества, нелинейных восприимчивостей и фазового синхронизма для различных нелинейно-оптических процессов.

### уметь:

- проводить экспериментальные исследования нелинейно-оптических процессов.

### владеть:

- методологией выбора адекватных методов исследования;
- навыками самостоятельной работы в лаборатории и Интернете;
- культурой постановки и моделирования физических задач;
- основными навыками представления своих результатов на семинарах, конференциях;
- навыками освоения большого объема информации, включая работу с научной литературой;
- основными навыками написания научных статей.
- математическим моделированием физических задач.
- практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач;
- экспериментальными и теоретическими методами исследования нелинейно-оптических процессов.

## 3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

Пример домашнего задания представлен в прикрепленном файле.

## 4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Промежуточная аттестация в 9 семестре (осеннем) по дисциплине «Нелинейная оптика» осуществляется в форме дифференцированного зачета. Зачет проводится в устной форме.

Промежуточный – домашнее задания, итоговый – дифференцированный зачет (билет содержит 1 вопрос и 1 задачу).

В семестре проводится одна контрольная работа, выполняются три домашних задания.

Итоговая аттестация в 10 семестре (весеннем) проводится в виде экзамена в устной форме (экзаменационный билет содержит 2 вопроса и 1 задачу).

Примеры контрольных вопросов и задач представлены в прикрепленном файле.

Примеры экзаменационных билетов.

9 семестр.

Билет 1.

1. Взаимодействие электромагнитных волн с диэлектрической средой.

Что такое нелинейная оптика?

2. Задача. Оценить порядок «атомной» единицы интенсивности светового поля – интенсивности, при которой напряженность поля равна кулоновскому полю протона на расстоянии боровского радиуса.

Билет 2.

1. Накопление нелинейных эффектов. Волновой синхронизм

2. Задача. Оценить порядок «релятивистской» интенсивности светового поля, в котором энергия осцилляции электрона становится сравнимой с его энергией покоя.

Билет 3.

1. Параметрическая генерация света. Параметрическая люминесценция
2. Задача. Показать, что в средах с кубической нелинейностью показатель преломления зависит от интенсивности света следующим образом:  $n = n_0 + n_2 \cdot I$  .

10 семестр.

Билет 1.

1. Вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна.
2. Задача. В кубично-нелинейный диэлектрик в одном направлении входят две световые волны с частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$  . Какой спектр волн можно ожидать на выходе?
3. Возможность компенсации оптических аберраций с помощью ОВФ.

Билет 2.

1. Понятие обращения волнового фронта. Возможность компенсации искажений волнового фронта в лазерных усилителях.
2. Задача. Получить выражение для пороговой мощности ВРМБ в сфокусированном в нелинейную среду пучке плоской световой волны, ограниченной круглой диафрагмой. Коэффициент усиления стоксова излучения в нелинейной среде, нормированный на единицу интенсивности,  $g$  , длина волны световой волны  $\lambda$ , пороговый инкремент  $G_{пор}$  .Возможность компенсации оптических аберраций с помощью ОВФ.
3. Обращение волнового фронта неполяризованного лазерного излучения при вынужденном рассеянии Мандельштама-Бриллюэна

#### Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

## **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

Дифференцированный зачет проводится в устной форме по билетам. В каждом билете представлено: один теоретический вопрос, одна задача. Экзамен проводится в устной форме по билетам. В каждом билете представлено: один теоретический вопрос, одна задача и один уточняющий вопрос по теме курса. При проведении зачета и экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося не должен превышать одного астрономического часа.