

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова
Филиал Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова
в городе Сарове

УТВЕРЖДАЮ



Директор филиала МГУ в г. Сарове
член-корреспондент РАН В.В.Воеводин

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Наименование дисциплины:

ПРИНЦИПЫ НЕЛИНЕЙНОЙ ОПТИКИ

Уровень высшего образования:

Магистратура

Направление подготовки:

03.04.02 Физика

Направленность (профиль) ОПОП:

Лазерная нелинейная оптика и фотоника

Квалификация «Магистр»

Форма обучения: Очная

Саров 2021 г.

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлению подготовки 03.04.02 Физика в редакции приказа по МГУ от 30 декабря 2020 г. №1366.

Авторы–составители:

К.ф.-м.н., доцент Головнин Илья Владимирович, кафедра общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ

Аннотация к рабочей программе дисциплины

«Принципы нелинейной оптики»

В курсе изучаются физические процессы и явления, связанные с распространением световых волн в оптически прозрачных средах и относящиеся к лазерной физике и нелинейной оптике.

Рассмотрены основные понятия нелинейной оптики, процессы на квадратичной и кубической нелинейностях. Описаны особенности нелинейного взаимодействия в случае сверхкоротких импульсов.

Изложены физические основы работы модуляторов оптического излучения, применяемых в лазерной физике.

1. Место дисциплины в структуре ОПОП ВО

Дисциплина Принципы нелинейной оптики реализуется на 1-ом курсе в 1-ом семестре и относится к вариативной части программы обучения (курс по выбору).

В результате освоения дисциплины «Принципы нелинейной оптики» обучающийся кроме знаний предмета получает навыки применения ранее полученных знаний для решения новых научных и практических задач.

2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия

Освоение дисциплин «Электромагнетизм», «Электродинамика», «Оптика», «Математический анализ», «Квантовая механика», «Дифференциальные уравнения», «Теория колебаний», «Теория волн».

3. Результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с формируемыми компетенциями

В результате освоения дисциплины у обучающихся должны быть сформированы:

Формируемые компетенции (код компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю)
Способность использовать знания современных проблем и новейших достижений в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники в своей научно-исследовательской деятельности (СПК-1)	Знать основные законы и направления современных научных исследований в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники. Уметь на основе фундаментальных знаний в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники, определять возможные направления научных исследований. Владеть необходимой информацией из современных отечественных и зарубежных источников по тематике избранного направления исследования в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники.
Способность организовать и планировать физические исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники и решать их с помощью современной аппаратуры, оборудования и	Знать базовые принципы организации научных исследований с использованием информационных технологий, основные методики работы на современном научном оборудовании в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники. Уметь используя знания в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники проводить научные исследования. Владеть навыками планирования научного исследования, анализа получаемых результатов, обобщения, оформления и публичного представления полученных результатов.

информационных технологий (СПК-2)	
Способность определять основные направления внедрения научных результатов в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники (СПК-3).	<p>Знать основные направления инновационного развития в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники.</p> <p>Уметь проводить необходимый анализ современных тенденций научных инноваций в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники для подготовки предложений по внедрению полученных научных результатов.</p> <p>Владеть методами обоснования возможного применения полученных научных результатов с учетом современных достижений в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники.</p>

4. **Форма обучения:** очная

5. **Язык обучения:** русский

6. **Содержание дисциплины:**

Тема 1. Линейные и нелинейные оптические среды.

Линейная поляризация. Линейная оптика. Область применимости. Коэффициент поглощения, коэффициент преломления. Понятие области прозрачности. Закон Бугера – Ламберта – Бера. Физическая модель распространения света в веществе. Линейная восприимчивость, дипольный момент, поляризация среды, диэлектрическая проницаемость. Понятие материального уравнения. Модель гармонического осциллятора. Вывод материального уравнения. Слабые и сильные электромагнитные поля, Отклонение от линейной зависимости в выражении материального уравнения. Определение силы или слабости электромагнитного поля. Физическая модель распространения света в нелинейной среде. Влияние симметрии вещества на возникновение четных и нечетных гармоник. Нелинейная поляризация. Уравнения Максвелла и материальное уравнение. Понятие линейной и нелинейной оптической восприимчивости. Тензорный характер материального уравнения. Волновое уравнение для нелинейной изотропной среды. Выражение для нелинейной поляризации с квадратичной нелинейностью. Квадратичная нелинейность. Взаимодействие трех волн. Нелинейная поляризация среды для квадратичной нелинейности в одномерном скалярном приближении. Части квадратичной нелинейной поляризации соответствующие разным частотам: $P(2\omega_1)$, $P(2\omega_2)$, $P(\omega_1 \pm \omega_2)$, $P(0)$. Классификация нелинейных эффектов на квадратичной нелинейности. Краткая классификация нелинейных эффектов на кубической нелинейности.

Тема 2. Генерация суммарной частоты и второй гармоники.

Система укороченных уравнений для амплитуд поля в квадратичной среде. Волновое уравнение в приближении плоских волн. Метод медленно меняющихся амплитуд. Анализ укороченных уравнений. Генерация второй гармоники в приближении заданного поля. Общий случай. $\Delta k \neq 0$. Понятие когерентной длины $l_{\text{ког}}$. Случай фазового синхронизма. $\Delta k = 0$. Понятие нелинейной длины $L_{\text{нл}}$. Понятие качества нелинейного материала: d^2/n^3 . Генератор второй гармоники, как частотно-пространственный фильтр. Согласование фаз.

Изотропные среды. Анизотропные среды. Отрицательные и положительные одноосные кристаллы. Типы взаимодействия. Понятие 90-градусного синхронизма. Генерация второй гармоники в незаданном поле. Решение укороченных уравнений в случае отсутствия поглощения. Анализ полученных соотношений, сравнение со случаем приближения заданного поля. Факторы, ограничивающие эффективность преобразования во вторую гармонику в реальных пучках: конечная расходимость пучков, угловая ширина синхронизма, частотная ширина синхронизма. конечная апертура пучков – снос пучков и апертурная длина, длительность импульса. Методы повышения эффективности преобразования излучения во вторую гармонику: внутррезонаторная генерация второй гармоники, генерация второй гармоники в дополнительном резонаторе.

Тема 3. Параметрическая генерация света.

Соотношения Менли-Роу. Получение соотношений Менли-Роу из укороченных уравнений для амплитуд в среде с квадратичной нелинейностью. Выводы из полученных результатов. Решение укороченных уравнений для действительных амплитуд и фаз при условии фазового синхронизма. Вырожденный случай. Экспоненциальный рост амплитуды субгармоники. Отличия от генерации второй гармоники. Решение укороченных уравнений в приближении заданного поля при условии фазового синхронизма. Параметрическое усиление света. Параметрический генератор света. Принципы перестройки частоты излучения параметрического генератора света.

Тема 4. Основы кристаллооптики.

Описание распространения электромагнитных волн в анизотропной среде. Система уравнений Максвелла для анизотропной среды. Преобразование тензора при повороте системы координат. Оптическая индикатриса. Свойство оптической индикатрисы. Обыкновенная и необыкновенная волны в одноосном кристалле. Оптические устройства – поляризационно селективные элементы. Классификация кристаллов. Распространение света в одноосном кристалле. Линейный электрооптический эффект. Синхронизм при генерации второй гармоники и вычисление эффективной нелинейности. Упрощение вида тензора восприимчивости второго порядка за счет симметрии кристалла. Расчет эффективной нелинейности при генерации второй гармоники для кристаллов KDP и ниобата лития..

Тема 5. Методы модуляции света.

Модуляторы, основанные на поперечном и продольном электрооптическом эффекте. Акустооптические модуляторы. Магнитооптические модуляторы. Невзаимные эффекты в оптике. Оптический диод.

Тема 6. Распространение и фокусировка гауссовых пучков.

Параболическое уравнение. Приближение квазиоптики. Решение параболического уравнения. Распространение и дифракция гауссова пучка. Фокусировка гауссова пучка. Размеры фокальной области линзы. Критерий применимости приближения квазиоптики.

Тема 7. Реальные пучки.

Критерий качества лазерного пучка. Методы измерения параметров лазерного пучка.

Тема 8. Распространение волнового пакета в линейной среде с дисперсией.

Связь между фазовой и групповой скоростью. Дисперсионное расплывание. Приближения теории дисперсии. Второе приближение теории дисперсии, аналогия с дифракцией световых пучков.

Тема 9. Взаимодействие волновых пакетов в нелинейной среде

Квадратичная нелинейность. Генерация второй гармоники коротким импульсом при расстройке групповых скоростей. Параметрическое усиление коротких импульсов. Кубическая нелинейность. Самовоздействие коротких импульсов. Фазовая и пространственная модуляция коротких световых импульсов.

7. Объем дисциплины

НАЗВАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	Трудоемкость в зачетных единицах	объем учебной нагрузки в ак. часах				
		Общая трудоемкость	в том числе ауд. занятий			Самостоятельная работа студентов
			Общая аудиторная нагрузка	Лекций	Семинаров	
Принципы нелинейной оптики	2	72	36	18	18	36

8. Структурированное по темам (разделам) содержание дисциплины (модуля) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий

Изучение курса «Принципы нелинейной оптики» включает в себя лекции, на которых рассматривается теоретическое содержание курса, обсуждение вопросов, обозначенных в темах дисциплины; самостоятельную работу, заключающуюся в подготовке к лекционным занятиям, выполнения домашних заданий. По вопросам, вызывающим затруднения, проводятся консультации.

№ темы	Наименование раздела дисциплины	Виды учебной нагрузки и их трудоемкость, часы	Форма текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации

		Всего часов	Лекции	Научно-практические	Семинары	Самостоятельная работа	
1	Линейные и нелинейные оптические среды.	4	2	-	2	2	Собеседование, опрос
2	Генерация суммарной частоты и второй гармоники.	11	3	-	2	6	
3	Параметрическая генерация света	8	2	-	2	4	
4	Основы кристаллооптики	11	2		3	6	
5	Методы модуляции света	8	2		2	4	
6	Распространение и фокусировка гауссовых пучков	4	1		1	2	
7	Свойства реальных пучков	4	1		1	2	
8	Распространение волнового пакета в линейной среде с дисперсией	8	2		2	4	
9	Взаимодействие волновых пакетов в нелинейной среде	12	3		3	6	
	Промежуточная аттестация	4				4	Экзамен в устной форме
ИТОГО:		72	18	-	18	36	

9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.

Текущий контроль по дисциплине «Принципы нелинейной оптики» осуществляется на лекциях и заключается в оценке активности слушателей, качества ответов на вопросы лектора, аргументированности позиции студента, оценивается широта используемых им теоретических знаний. В семестре в конце некоторых лекций проводятся несколько коротких контрольных работ (10 – 15 минут).

Промежуточная аттестация по дисциплине «Принципы нелинейной оптики» проводится в форме экзамена. Результаты сдачи экзамена оцениваются по шкале «неудовлетворительно», «удовлетворительно», «хорошо», «отлично». Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

10. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).

Требования к структуре и содержанию фонда оценочных средств текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине

Перечень оценочных средств, применяемых на каждом этапе проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине, представлены в таблице

Наименование оценочного средства	Краткая характеристика оценочного средства	Представление оценочного средства в фонде
Оценочные средства текущего контроля		
Тематический опрос (в форме ответов на вопросы)	Средство контроля, организованное как короткий письменный ответ на поставленный вопрос по тематике предыдущей или текущей лекции, рассчитанное на выяснение объема и качества знаний, усвоенных обучающимися по определенному разделу, теме, проблеме.	Перечень тем, изучаемых в рамках дисциплины
Собеседование (в форме беседы, дискуссии по теме)	Средство контроля, организованное как свободная беседа, дискуссия по тематике изучаемой дисциплины, рассчитанное на выяснение объема знаний обучающегося по всем изученным разделам, темам; свободного использования терминологии для аргументированного выражения собственной позиции.	Перечень тем, изучаемых в рамках дисциплины
Оценочные средства промежуточной аттестации		
Короткая письменная работа	Средство, позволяющее оценить сформированность систематических представлений о методах научно-исследовательской деятельности.	Перечень вопросов к экзамену

11. Шкала оценивания.

Планируемые результаты обучения	Критерии оценивания результатов обучения			
	2	3	4	5
ЗНАТЬ: принципы работы нелинейно-оптических преобразователей частоты лазерного излучения и модуляторов излучения. ОПК-3.Б 3-6	Отсутствие знаний принципов работы нелинейно-оптических преобразователей частоты лазерного излучения и модуляторов излучения.	В целом успешные, но не систематические знания принципов работы нелинейно-оптических преобразователей частоты лазерного излучения и модуляторов излучения.	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы знания принципов работы нелинейно-оптических преобразователей частоты лазерного излучения и модуляторов излучения.	Успешные и систематические знания принципов работы нелинейно-оптических преобразователей частоты лазерного излучения и модуляторов излучения.
УМЕТЬ: рассчитывать основные параметры и	Отсутствие умения рассчитывать основные параметры и работать с	В целом успешное, но не систематическое	В целом успешное, но содержащее	Успешное и систематическое умение рассчитывать

<p>работать с нелинейно-оптическими преобразователями частоты лазерного излучения и модуляторами излучения.</p> <p>ОПК-3.Б У-6</p>	<p>нелинейно-оптическими преобразователями частоты лазерного излучения и модуляторами излучения.</p>	<p>ое умение рассчитывать основные параметры и работать с нелинейно-оптическими преобразователями частоты лазерного излучения и модуляторами излучения.</p>	<p>отдельные пробелы умение рассчитывать основные параметры и работать с нелинейно-оптическими преобразователями частоты лазерного излучения и модуляторами излучения.</p>	<p>основные параметры и работать с нелинейно-оптическими преобразователями частоты лазерного излучения и модуляторами излучения.</p>
<p>ВЛАДЕТЬ: методами описания и расчета нелинейно-оптических устройств и модуляторов излучения.</p> <p>ОПК-3.Б В-6</p>	<p>Отсутствие/фрагментарное владение методами описания и расчета нелинейно-оптических устройств и модуляторов излучения.</p>	<p>В целом успешное, но не систематическое владение методами описания и расчета нелинейно-оптических устройств и модуляторов излучения.</p>	<p>В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы методами описания и расчета нелинейно-оптических устройств и модуляторов излучения.</p>	<p>Успешное и систематическое владение методами описания и расчета нелинейно-оптических устройств и модуляторов излучения.</p>

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

Материалы текущего контроля успеваемости обучающихся:

Пример:

1. Факторы, ограничивающие эффективность при генерации второй гармоники. Угловая и частотная ширина синхронизма. Апертурная длина.
2. Физическое обоснование разделения электрооптических констант на низкочастотную и высокочастотную область.
3. Оценить быстродействие акустооптического модулятора из плавленого кварца.
4. Рассчитать полосу усиления кристалла ниобата лития при вырожденном параметрическом взаимодействии в случае длины волны накачки равной 532 нм.
5. Классификация нелинейных эффектов на квадратичной нелинейности.

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

Материалы промежуточного контроля успеваемости обучающихся в форме экзамена:

1. Понятие области прозрачности. Линейная восприимчивость, дипольный момент, поляризация среды, диэлектрическая проницаемость. Модель гармонического осциллятора. Вывод материального уравнения.
2. Слабые и сильные электромагнитные поля, Отклонение от линейной зависимости в выражении материального уравнения. Определение силы или слабости электромагнитного поля. Влияние симметрии вещества на возникновение четных и нечетных гармоник.
3. Нелинейная поляризация. Уравнения Максвелла и материальное уравнение для нелинейной среды. Понятие линейной и нелинейной оптической восприимчивости. Волновое уравнение для нелинейной изотропной среды.
4. Взаимодействие трех волн. Нелинейная поляризация среды для квадратичной нелинейности в одномерном скалярном приближении. Части квадратичной нелинейной поляризации соответствующие разным частотам: $P(2\omega_1)$, $P(2\omega_2)$, $P(\omega_1 \pm \omega_2)$, $P(0)$. Классификация нелинейных эффектов на квадратичной нелинейности.
5. Система укороченных уравнений для амплитуд поля в квадратичной среде. Волновое уравнение в приближении плоских волн. Метод медленно меняющихся амплитуд.
6. Генерация второй гармоники в приближении заданного поля. Общий случай. $\Delta k \neq 0$. Понятие когерентной длины $l_{\text{ког}}$. Случай фазового синхронизма. $\Delta k = 0$. Понятие нелинейной длины $L_{\text{нл}}$. Понятие качества нелинейного материала: d^2/n^3 .
7. Согласование фаз. Изотропные среды. Анизотропные среды. Отрицательные и положительные одноосные кристаллы. Типы взаимодействия. Понятие 90-градусного синхронизма.
8. Генерация второй гармоники в незаданном поле. Решение укороченных уравнений в случае отсутствия поглощения. Анализ полученных соотношений, сравнение со случаем приближения заданного поля.
9. Факторы, ограничивающие эффективность преобразования во вторую гармонику в реальных пучках: конечная расходимость пучков, угловая ширина синхронизма, частотная ширина синхронизма. конечная апертура пучков – снос пучков и апертурная длина, длительность импульса. Методы повышения эффективности преобразования излучения во вторую гармонику.
10. Соотношения Менли-Роу. Получение соотношений Менли-Роу из укороченных уравнений для амплитуд в среде с квадратичной нелинейностью.
11. Вырожденный случай параметрического взаимодействия. Решение укороченных уравнений для действительных амплитуд и фаз при условии фазового синхронизма. Отличия от генерации второй гармоники.
12. Параметрическое усиление света. Решение укороченных уравнений в приближении заданного поля при условии фазового синхронизма. Параметрический генератор света. Принципы перестройки частоты излучения параметрического генератора света.
13. Описание распространения электромагнитных волн в анизотропной среде. Система уравнений Максвелла для анизотропной среды. Преобразование тензора при повороте системы координат.
14. Оптическая индикатриса. Свойство оптической индикатрисы. Обыкновенная и необыкновенная волны в одноосном кристалле.
15. Распространение света в одноосном кристалле. Линейный электрооптический эффект.
16. Синхронизм при генерации второй гармоники в одноосных кристаллах и вычисление эффективной нелинейности.
17. Продольный и поперечный электрооптический эффект. Электрооптические константы.
18. Принцип действия электрооптического модулятора. Коноскопическая картина. Полуволновое напряжение.
19. Принцип действия электрооптического модулятора. Особенности дифракции Брегга. Быстродействие акустооптического модулятора.
20. Магнитооптический эффект. Принцип действия магнитооптического модулятора. Оптический изолятор.

21. Фокусировка гауссовых пучков в приближение квазиоптики.
22. Распространение и дифракция гауссова пучка. Фокусировка гауссова пучка. Критерий применимости приближения квазиоптики.
23. Критерий качества лазерного пучка. Методы измерения параметров лазерного пучка – центр тяжести, диаметр, параметр M^2 .
24. Связь между фазовой и групповой скоростью. Дисперсионное расплывание при распространении волнового пакета в линейной диспергирующей среде.
25. Квадратичная нелинейность. Генерация второй гармоники коротким импульсом при расстройке групповых скоростей.
26. Кубическая нелинейность. Самовоздействие коротких импульсов. Фазовая и пространственная модуляция коротких световых импульсов.

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

Основная литература.

1. Ф.Цернике, Дж.Мидвинтер. Прикладная нелинейная оптика. М.Мир. 1976.
2. В.Г.Дмитриев, Л.В.Тарасов Прикладная нелинейная оптика, М, ФИЗМАТЛИТ, 2004.
3. А.Ярив, П.Юх. Оптические волны в кристаллах. М, Мир, 1987.
4. Дж.Най. Физические свойства кристаллов, М, Мир, 1967.
5. А. Ярив, Введение в оптоэлектронику. М.: «Высшая школа», 1983
6. Е.Р.Мустель, В.Н.Парыгин. Методы модуляции и сканирования света. М.: Наука, 1965
7. Л.Н.Магдич, В.Я.Молчанов. Акустооптические устройства и их применение. М.: Сов. радио, 1978.
8. С.А.Ахманов, В.А.Выслоух, А.С.Чиркин. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. М.:Наука, 1988.
9. С.А.Козлов, В.В.Самарцев, Основы фемтосекундной оптики. М.:Физматлит, 2009
10. А.П.Сухоруков. Дифракция световых пучков в нелинейных средах. Соросовский образовательный журнал №6, 1996
11. А.П.Сухоруков. Оптика сверхкоротких импульсов. Соросовский образовательный журнал №7, 1997
12. Г.М.Зверев, Ю.Д.Голяев, Е.А.Шалаев, А.А.Шокин, Лазеры на алюмоиттриевом гранате с неодимом. М.: Радио и связь, 1985
13. Г.М.Зверев, Ю.Д.Голяев, Лазеры на кристаллах и их применение. М.:Рикел, 1994.
14. О.Звелто, Принципы лазеров, 4-е издание, М,Лань, 2008.
15. П.Г.Крюков, Лазеры ультракоротких импульсов. Обзор. Квантовая электроника, 31, №2, 2001, с.95
16. М.Б.Виноградова, О.В.Руденко, А.П.Сухоруков, Теория волн. Изд.2-е, доп. М.:Наука, 1990
17. Ю.А. Ананьев, Оптические резонаторы и лазерные пучки. М.:Наука, 1990
18. Test method for laser beam parameters: Beam width, divergence angle and beam propagation factor, Document ISO/DIS 11146, International Organization for Standardization; 1996.

Дополнительная литература.

1. Справочник по лазерам. Под редакцией А.М.Прохорова Т. 2, М, Советское радио 1978.
2. И.Р. Шен, Принципы нелинейной оптики, под ред. С.А.Ахманова, М: Наука, 1989
3. В.А. Алешкевич. Курс общей физики. Оптика. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011.
4. С.А.Ахманов, С.Ю.Никитин, Физическая оптика. М, Изд-во МГУ, Наука, 2004.
5. Н.Б.Делоне. Нелинейная оптика. М.:ФИЗМАТЛИТ, 2003

6. Г.Агравал. Нелинейная волоконная оптика. М.:Мир, 1996
7. С.А.Ахманов, Р.В.Хохлов. Проблемы нелинейной оптики. М, ВИНТИ, 1964.
8. Г.Г.Гудзарян, В.Г.Дмитриев, Д.Н.Никогосян, Нелинейно-оптические кристаллы. Свойства и применение в квантовой электронике: Справочник. М.: Радио и связь, 1991

Интернет-ресурсы.

Материально-техническое обеспечение

В соответствии с требованиями п.5.3. образовательного стандарта МГУ по направлению подготовки «Физика».

Для лекционной части курса требуются аудитория, оборудованная мультимедийным проектором, интерактивной доской, и управляющим компьютером. Также необходимо наличие экрана и обычной учебной доски.