

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»
Физический факультет

УТВЕРЖДАЮ
И.о. декана физического факультета МГУ,
профессор, д.ф.-м.н.



В.В. Белокуров /

« 27 » марта 2024 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Радиофизика

Radiophysics

Программа (программы) подготовки
научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре
Радиофизика
(103-01-00-134-фмн)

Москва 2024

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с Приказом по МГУ от 24 ноября 2021 года № 1216 «Об утверждении Требований к основным программам подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре, самостоятельно устанавливаемых Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова».

1. Краткая аннотация:

Название дисциплины: Радиофизика.

Цель изучения дисциплины – расширение и углубление знаний о современном состоянии и тенденциях развития в области радиофизики.

2. Уровень высшего образования - подготовка кадров высшей квалификации.

3. Научная специальность: 1.3.4 Радиофизика; область науки: естественные науки.

4. Место дисциплины (модуля) в структуре Программы аспирантуры: дисциплины (модули), направленные на подготовку к кандидатским экзаменам - Дисциплина, совпадающая с наименованием научной специальности.

5. Объем дисциплины (модуля) в зачетных единицах с указанием количества академических или астрономических часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающихся:

Объем дисциплины (модуля) составляет 3 зачетных единицы, всего 108 часов, из которых 54 часа составляет контактная работа аспиранта с преподавателем (46 часов занятия лекционного типа, 8 часов мероприятия текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации), 54 часа составляет самостоятельная работа учащегося.

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

Необходимы знания высшей математики и общей физики в объеме курсов, преподаваемых на физических специальностях классических университетов, полученных на предыдущих уровнях высшего образования.

7. 1 Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам:

Тема 1. Колебания в системах с одной степенью свободы

Понятие колебательной системы. Силовое и параметрическое воздействие на линейные и слабонелинейные колебательные системы. Автоколебательная система с одной степенью свободы. Энергетические соотношения в автоколебательных системах. Методы расчета автоколебательных систем. Укороченные уравнения. Усреднение в системах, содержащих быстрые и медленные движения. Воздействие гармонического сигнала на автоколебательные системы. Синхронизация. Явления захватывания и гашения колебаний. Применение захватывания для стабилизации частоты. Временные и спектральные методы оценки устойчивости. Хаотические колебания в динамических системах. Понятие о хаотическом (странном) аттракторе. Возможные пути потери устойчивости регулярных колебаний и перехода к хаосу.

Тема 2. Колебательные системы с двумя и многими степенями свободы

Нормальные колебания. Вынужденные колебания. Автоколебательные системы с двумя и более степенями свободы. Явление затягивания частоты. Взаимная синхронизация колебаний двух генераторов. Параметрическое усиление и параметрическая генерация, деление частоты. Вынужденные колебания в системах с n степенями свободы. Системы с n степенями свободы с нелинейной реактивностью. Соотношения Мэнли - Роу. Понятие о распределённой колебательной системе. Телеграфные уравнения и условия их применимости в неквазистационарной системе. Собственные колебания в системах конечной длины. Колебания в цепочке атомов (модель одномерного кристалла). Акустические и оптические фононы. Дисперсионные зависимости для одноатомных и двухатомных структур.

Тема 3. Распределенные автоколебательные системы. Лазер как пример такой системы

Принцип работы, устройство и параметры лазеров (примеры: гелий-неоновый лазер, лазер на рубине, полупроводниковый лазер). Оптические резонаторы. Резонатор Фабри-Перо, конфокальный и концентрический резонаторы. Неустойчивый резонатор. Продольные и поперечные типы колебаний. Спектр частот и расходимость излучения. Добротность. Режимы работы лазеров: непрерывный режим генерации, режим модуляции добротности резонатора, режим синхронизации мод. Сверхкороткие импульсы. Шумы лазеров, формула Таунса и предельная стабильность частоты. Оптические компрессоры и получение фемтосекундных импульсов. Молекулярный генератор. Квантовые стандарты частоты (времени).

Тема 4. Методы модуляции света

Взаимодействие света со звуком. Дифракция Брэгга и Рамана-Ната. Принципы работы устройств акустооптики (модуляторы и дефлекторы света, преобразователи свет-сигнал, акустооптические фильтры), анализаторы спектра и корреляторы. Линейный электрооптический и магнитооптический эффекты и их применение для управления светом.

Тема 5. Плоские волны в однородной изотропной среде

Понятие о волновых процессах. Волновое уравнение. Плоские однородные и неоднородные волны. Уравнения механики сплошных сред, уравнения Максвелла и материальные уравнения. Плоские акустические волны в вязкой теплопроводящей среде, упругие продольные и поперечные волны в твердом теле, электромагнитные волны в среде с проводимостью. Поток энергии. Поляризация.

Тема 6. Волны в диспергирующих средах

Физика взаимодействия электромагнитной волны со средой. Комплексная диэлектрическая проницаемость. Связь между дисперсией и поглощением. Дисперсионные соотношения Крамерса-Кронига и принцип причинности. Простейшие физические модели диспергирующих

сред. Частотная дисперсия. Пространственная дисперсия. Связь между дисперсией и поглощением. Волновой пакет в диспергирующей среде. Фазовая и групповая скорости. Метод медленно меняющейся огибающей. Первое и второе приближения теории дисперсии. Вывод параболического уравнения для огибающей пакета, его общее решение. Гауссов импульс в диспергирующей среде. Эффект дисперсионного расплывания. Компрессия частотно-модулированного импульса.

Тема 7. Распространение ограниченных гауссовых пучков. Дифракция

Метод Кирхгофа в теории дифракции. Функции Грина. Условия излучения. Угловой спектр плоских волн. Дифракция Френеля и Фраунгофера. Дифракция слабо расходящихся волновых пучков. Пространственно-временная аналогия в теории волн. Параболическое уравнение в теории дифракции. Дифракция гауссовых пучков. Решение параболического уравнения для а) гауссова пучка с первоначально плоским фазовым фронтом, б) сфокусированного гауссова пучка с радиусом кривизны R . Поведение параметров пучка. Характеристики поля в фокусе линзы. Линзовые линии. Открытые резонаторы.

Тема 8. Распространение волн в анизотропных средах

Свойства электромагнитных волн в анизотропных средах. Оптические кристаллы, уравнение Френеля, обыкновенная и необыкновенная волны. Магнитоактивные среды. Тензор диэлектрической проницаемости плазмы в магнитном поле; нормальные волны, их поляризация.

Тема 9. Волны в периодических структурах

Волны в периодических структурах. Механические цепочки, акустические и оптические фононы. Полосы пропускания и непрозрачности. Электрические цепочки, сплошная среда со слабыми периодическими неоднородностями. Метод связанных волн, его применение в электронных лампах СВЧ с продольным взаимодействием.

Тема 10. Волны в неоднородных сплошных средах

Волны в неоднородных сплошных средах. Приближение геометрической оптики. Вывод уравнений эйконала и переноса. Дифференциальное уравнение траектории луча в слоисто-неоднородной среде. Лучи и поле волны в слоисто-неоднородных средах. Линейный и параболический неоднородный слой. Волноводное распространение. Геометрическое и дифракционное приближения при анализе распространения радиоволн. Область, существенная при распространении, и влияние земной поверхности (закон Релея). Показатели преломления тропосферы и ионосферы. Рефракция и инверсии показателя преломления. Атмосферные волноводы. Рассеяние и поглощение радиоволн в тропосфере. Случайные неоднородности тропосферы и закон «двух третей» Колмогорова-Обухова. Дисперсия и поглощение радиоволн в ионосферной плазме. Ход лучей в подводном звуковом канале.

Тема 11. Распространение волн в присутствии направляющих систем и в волноводах

Волноводы, длинные линии и резонаторы. Электромагнитные волны в металлических волноводах. Диэлектрические волноводы, световоды. Критическая частота и критическая длина волновода. ТЕ-, ТН- и ТЕМ-волны. Периодические структуры и замедляющие системы. Волновое сопротивление.

Тема 12. Усиление и генерация волн в СВЧ-диапазоне

Усилители СВЧ-диапазона (резонаторный, бегущей волны). Полоса пропускания усилителя бегущей волны.

Генерация волн в СВЧ-диапазоне. Принцип работы и устройство лампы бегущей и обратной волны, магнетрона и клистрона. Отрицательное дифференциальное сопротивление и генераторы СВЧ на полевых транзисторах, туннельных диодах, диодах Ганна и лавиннопролетных диодах. Эффект Джозефсона.

Тема 13. Антенны как пример излучающих систем

Вибратор Герца. Ближняя и дальняя зоны. Диаграмма направленности. Коэффициент усиления и коэффициент рассеяния антенны. Антенны для ДВ-, СВ- и СВЧ-диапазонов. Параболическая антенна. Фазированные антенные решетки. Эффективная площадь и шумовая температура приемной антенны. Фрактальные антенны.

Тема 14. Нелинейные акустические волны и волновые пучки в средах без дисперсии

Нелинейные волновые явления в различных разделах физики. Нелинейные среды. Нарушение принципа суперпозиции. Среда без дисперсии с квадратичной нелинейностью. Нелинейные акустические волны. Простые волны Римана. Инварианты Римана. Уравнение простых волн произвольной амплитуды в идеальном газе, его решение. Уравнение простых волн для адиабатического уравнения состояния, его решение. Связь параметров в простой волне. Уравнение простых волн в идеальном газе при малых числах Маха, его решение. Длина образования разрыва. Графический анализ искажения формы простой волны. Пилообразный профиль. Искажение спектра первоначально гармонической волны, решение Бесселя-Фубини. Ударные волны. Простая волна после образования разрыва. Правило «равенства» площадей. Нелинейное затухание. Интенсивные акустические пучки. Уравнение Хохлова-Заболотской. Параметрические излучатели звука.

Тема 15. Нелинейные акустические волны в диссипативной среде и в среде со слабой дисперсией

Уравнение Бюргерса, его линеаризация по Хопфу-Коулу, Стационарное решение в виде кинка-диссипативный солитон. Решение Хохлова. Уравнение Кортевега – де Вриза и его стационарное решение в форме солитона. Столкновение солитонов.

Тема 16. Основы теории волновых взаимодействий в условиях сильного проявления дисперсии среды

Среда с сильной дисперсией. Уравнения для нелинейных волн и методы их анализа. Взаимодействия электромагнитных волн на нелинейностях различного порядка. Метод медленно меняющихся амплитуд в нелинейной оптике. Фазовый синхронизм.

Тема 17. Параметрические взаимодействия в нелинейной оптике

Генерация второй гармоники. Законы сохранения. Физический смысл основных характерных длин. Методика решения задач о взаимодействии основной волны и волны второй гармоники в приближении заданного поля основной волны. Синхронная генерация гармоники путем подбора дисперсии среды. Методика решения задач о сильном взаимодействии основной и второй гармоник. Трехчастотное взаимодействие в средах с квадратичной нелинейностью. Законы сохранения. Методика решения задач с использованием соотношений Мэнли-Роу для интенсивностей и числа квантов. Генерация волн на разностной и суммарной частотах в среде с квадратичной нелинейностью. Биения амплитуд, быстрые и медленные моды. Распадная неустойчивость высокочастотных волн. Параметрическое усиление низкочастотных волн. Принцип перестройки частоты.

Тема 18. Самовоздействие волновых пакетов и пучков

Нелинейная квазиоптика. Нелинейная геометрическая оптика. Метод безабберационного приближения. Дифракция волн в нелинейной среде. Самовоздействие волновых пучков. Самофокусировка света. Волноводное распространение пучков. Обращение волнового фронта.

Тема 19. Случайные процессы и их характеристики. Основные модели случайных процессов

Случайные величины и процессы, способы их описания. Стационарный случайный процесс. Статистическое усреднение и усреднение во времени. Эргодичность. Измерение вероятностей и средних значений.

Корреляционные и спектральные характеристики стационарных случайных процессов. Теорема Винера-Хинчина. Белый шум и другие примеры спектров и корреляционных функций.

Модели случайных процессов: гауссовский процесс, узкополосный стационарный шум, импульсные случайные процессы, дробовой шум.

Тема 20. Шумовые колебания. Флуктуационные уравнения

Отклик линейной системы на шумовые воздействия; функция Грина, интеграл Дюамеля. Действие шума на колебательный контур, фильтрация шума. Нелинейные преобразования (умножения частоты и амплитудное детектирование узкополосного шума). Марковские и диффузионные процессы. Уравнение Фоккера-Планка. Броуновское движение. Флуктуационно-диссипационная теорема. Тепловой шум; классический и квантовый варианты формулы Найквиста. Тепловое излучение абсолютно черного тела.

Тема 21. Случайные поля и волны

Случайные поля. Пространственная и временная когерентность. Дифракция случайных волн. Теорема Ван Циттерта-Цернике. Дифракция регулярной волны на случайном фазовом экране. Тепловое электромагнитное поле. Теорема взаимности. Рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Рассеяние волн на шероховатой поверхности. Понятие об обратной задаче рассеяния. Борновское приближение, метод малых возмущений и метод плавных возмущений. Взаимодействие случайных волн. Генерация второй оптической гармоники, самофокусировка и самомодуляция частично когерентных волн. Преобразование спектров шумовых волн в нелинейных средах без дисперсии.

Тема 22. Сигнал и шум

Задачи оптимального приема сигнала. Апостериорная плотность вероятности. Функция правдоподобия. Статистическая проверка гипотез. Критерии Байеса, Неймана-Пирсона и Вальда проверки гипотез. Априорные сведения о сигнале и шуме. Наблюдение и сообщение. Задачи интерполяции, фильтрации и экстраполяции.

Тема 23. Методы выделения сигнала из шума

Линейная фильтрация Колмогорова-Винера на основе минимизации дисперсии ошибки. Принцип ортогональности ошибки и наблюдения. Реализуемые линейные фильтры и уравнение Винера-Хопфа. Выделение сигнала из шума. Согласованный фильтр. Линейный фильтр Калмана-Бьюси. Стохастические уравнения для модели сообщения и шума. Дифференциальные уравнения фильтра. Уравнение для апостериорной информации в форме уравнения Риккати. Сравнение фильтрации методом Колмогорова-Винера и Калмана-Бьюси. Основные задачи нелинейной фильтрации и синтеза систем.

7.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам и часам

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля), форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	Всего (часы)	В том числе								
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них						Самостоятельная работа обучающегося, часы из них		
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Групповые консультации	Индивидуальные консультации	Учебные занятия, направленные на проведение текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации	Всего	Выполнение домашних заданий	Подготовка к коллоквиумам	Всего
Тема 1. Колебания в системах с одной степенью свободы. <i>Понятие колебательной системы. Силовое и параметрическое воздействие на линейные и слабонелинейные колебательные системы. Автоколебательная система с одной степенью свободы. Энергетические соотношения в автоколебательных системах. Методы расчета автоколебательных систем. Укороченные уравнения. Усреднение в системах, содержащих быстрые и</i>	4	2					2	2		2

медленные движения. Воздействие гармонического сигнала на автоколебательные системы. Синхронизация. Явления захватывания и гашения колебаний. Применение захватывания для стабилизации частоты. Временные и спектральные методы оценки устойчивости. Хаотические колебания в динамических системах. Понятие о хаотическом (странном) аттракторе. Возможные пути потери устойчивости регулярных колебаний и перехода к хаосу.										
Тема 2. Колебательные системы с двумя и многими степенями свободы. Нормальные колебания. Вынужденные колебания. Автоколебательные системы с двумя и более степенями свободы. Явление затягивания частоты. Взаимная синхронизация колебаний двух генераторов. Параметрическое усиление и параметрическая генерация, деление частоты. Вынужденные колебания в системах с n степенями свободы. Системы с n степенями свободы с нелинейной реактивностью. Соотношения	4	2					2	2		2

Мэнли - Роу. Понятие о распределённой колебательной системе. Телеграфные уравнения и условия их применимости в неквазистационарной системе. Собственные колебания в системах конечной длины. Колебания в цепочке атомов (модель одномерного кристалла). Акустические и оптические фононы. Дисперсионные зависимости для одноатомных и двухатомных структур.										
Тема 3. Распределенные автоколебательные системы. Лазер как пример такой системы. Принцип работы, устройство и параметры лазеров (примеры: гелий-неоновый лазер, лазер на рубине, полупроводниковый лазер). Оптические резонаторы. Резонатор Фабри-Перо, конфокальный и концентрический резонаторы. Неустойчивый резонатор. Продольные и поперечные типы колебаний. Спектр частот и расходимость излучения. Добротность. Режимы работы лазеров: непрерывный режим генерации,	4	2					2	2		2

режим модуляции добротности резонатора, режим синхронизации мод. Сверхкороткие импульсы. Шумы лазеров, формула Таунса и предельная стабильность частоты. Оптические компрессоры и получение фемтосекундных импульсов. Молекулярный генератор. Квантовые стандарты частоты (времени).										
Тема 4. Методы модуляции света. Взаимодействие света со звуком. Дифракция Брэгга и Рамана-Ната. Принципы работы устройств акустооптики (модуляторы и дефлекторы света, преобразователи свет-сигнал, акустооптические фильтры), анализаторы спектра и корреляторы. Линейный электрооптический и магнитооптический эффекты и их применение для управления светом.	6	2				1	3	2	1	3
Тема 5. Плоские волны в однородной изотропной среде. Понятие о волновых процессах. Волновое уравнение. Плоские	4	2					2	2		2

однородные и неоднородные волны. Уравнения механики сплошных сред, уравнения Максвелла и материальные уравнения. Плоские акустические волны в вязкой теплопроводящей среде, упругие продольные и поперечные волны в твердом теле, электромагнитные волны в среде с проводимостью. Поток энергии. Поляризация.										
Тема 6. Волны в диспергирующих средах. Физика взаимодействия электромагнитной волны со средой. Комплексная диэлектрическая проницаемость. Связь между дисперсией и поглощением. Дисперсионные соотношения Крамерса-Кронига и принцип причинности. Простейшие физические модели диспергирующих сред. Частотная дисперсия. Пространственная дисперсия. Связь между дисперсией и поглощением. Волновой пакет в диспергирующей среде. Фазовая и групповая скорости. Метод медленно меняющейся огибающей. Первое и второе приближения теории дисперсии. Вывод параболического уравнения	4	2					2	2		2

для огибающей пакета, его общее решение. Гауссов импульс в диспергирующей среде. Эффект дисперсионного расплывания. Компрессия частотно-модулированного импульса.										
Тема 7. Распространение ограниченных гауссовых пучков. Дифракция. Метод Кирхгофа в теории дифракции. Функции Грина. Условия излучения. Угловой спектр плоских волн. Дифракция Френеля и Фраунгофера. Дифракция слабо расходящихся волновых пучков. Пространственно-временная аналогия в теории волн. Параболическое уравнение в теории дифракции. Дифракция гауссовых пучков. Решение параболического уравнения для а) гауссова пучка с первоначально плоским фазовым фронтом, б) сфокусированного гауссова пучка с радиусом кривизны R . Поведение параметров пучка. Характеристики поля в фокусе линзы. Линзовые линии. Открытые резонаторы.	6	3					3	3		3
Тема 8. Распространение волн в	6	3					3	3		3

анизотропных средах. Свойства электромагнитных волн в анизотропных средах. Оптические кристаллы, уравнение Френеля, обыкновенная и необыкновенная волны. Магнитоактивные среды. Тензор диэлектрической проницаемости плазмы в магнитном поле; нормальные волны, их поляризация.										
Тема 9. Волны в периодических структурах. Волны в периодических структурах. Механические цепочки, акустические и оптические фононы. Полосы пропускания и непрозрачности. Электрические цепочки, сплошная среда со слабыми периодическими неоднородностями. Метод связанных волн, его применение в электронных лампах СВЧ с продольным взаимодействием.	4	2					2	2		2
Тема 10. Волны в неоднородных сплошных средах. Волны в неоднородных сплошных средах. Приближение геометрической оптики. Вывод уравнений эйконала и переноса. Дифференциальное уравнение траектории луча в слоисто-	6	3					3	3		3

неоднородной среде. Лучи и поле волны в слоисто-неоднородных средах. Линейный и параболический неоднородный слой. Волноводное распространение. Геометрическое и дифракционное приближения при анализе распространения радиоволн. Область, существенная при распространении, и влияние земной поверхности (закон Релея). Показатели преломления тропосферы и ионосферы. Рефракция и инверсии показателя преломления. Атмосферные волноводы. Рассеяние и поглощение радиоволн в тропосфере. Случайные неоднородности тропосферы и закон «двух третей» Колмогорова-Обухова. Дисперсия и поглощение радиоволн в ионосферной плазме. Ход лучей в подводном звуковом канале.										
Тема 11. Распространение волн в присутствии направляющих систем и в волноводах. Волноводы, длинные линии и резонаторы. Электромагнитные волны в металлических волноводах. Диэлектрические волноводы, световоды.	6	3					3	3		3

Критическая частота и критическая длина волновода. ТЕ-, ТН- и ТЕМ-волны. Периодические структуры и замедляющие системы. Волновое сопротивление.										
Тема 12. Усиление и генерация волн в СВЧ-диапазоне. Усилители СВЧ-диапазона (резонаторный, бегущей волны). Полоса пропускания усилителя бегущей волны. Генерация волн в СВЧ-диапазоне. Принцип работы и устройство лампы бегущей и обратной волны, магнетрона и клистрона. Отрицательное дифференциальное сопротивление и генераторы СВЧ на полевых транзисторах, туннельных диодах, диодах Ганна и лавиннопролетных диодах. Эффект Джозефсона.	4	2					2	2		2
Тема 13. Антенны как пример излучающих систем. Вибратор Герца. Ближняя и дальняя зоны. Диаграмма направленности. Коэффициент усиления и коэффициент рассеяния антенны. Антенны для ДВ-, СВ- и СВЧ-диапазонов. Параболическая антенна.	6	2				1	3	2	1	3

Фазированные антенные решетки. Эффективная площадь и шумовая температура приемной антенны. Фрактальные антенны.										
Тема 14. Нелинейные акустические волны и волновые пучки в средах без дисперсии. Нелинейные волновые явления в различных разделах физики. Нелинейные среды. Нарушение принципа суперпозиции. Среда без дисперсии с квадратичной нелинейностью. Нелинейные акустические волны. Простые волны Римана. Инварианты Римана. Уравнение простых волн произвольной амплитуды в идеальном газе, его решение. Уравнение простых волн для адиабатического уравнения состояния, его решение. Связь параметров в простой волне. Уравнение простых волн в идеальном газе при малых числах Маха, его решение. Длина образования разрыва. Графический анализ искажения формы простой волны. Пилообразный профиль. Искажение спектра первоначально гармонической волны, решение Бесселя-	4	2					2	2		2

Фубини. Ударные волны. Простая волна после образования разрыва. Правило «равенства» площадей. Нелинейное затухание. Интенсивные акустические пучки. Уравнение Хохлова-Заболотской. Параметрические излучатели звука.										
Тема 15. Нелинейные акустические волны в диссипативной среде и в среде со слабой дисперсией. Уравнение Бюргерса, его линеаризация по Хопфу-Коулу, Стационарное решение в виде кинка-диссипативный солитон. Решение Хохлова. Уравнение Кортевега – де Вриза и его стационарное решение в форме солитона. Столкновение солитонов.	4	2					2	2		2

Тема 16. Основы теории волновых взаимодействий в условиях сильного проявления дисперсии среды. Среды с сильной дисперсией. Уравнения для нелинейных волн и методы их анализа. Взаимодействия электромагнитных волн на нелинейностях различного порядка. Метод медленно меняющихся амплитуд в нелинейной оптике. Фазовый синхронизм.	4	2					2	2		2
Тема 17. Параметрические взаимодействия в нелинейной оптике. Генерация второй гармоники. Законы сохранения. Физический смысл основных характерных длин. Методика решения задач о взаимодействии основной волны и волны второй гармоники в приближении заданного поля основной волны. Синхронная генерация гармоники путем подбора дисперсии среды. Методика решения задач о сильном взаимодействии основной и второй гармоник. Трехчастотное взаимодействие в средах с квадратичной нелинейностью. Законы	4	2					2	2		2

сохранения. Методика решения задач с использованием соотношений Мэнли-Роу для интенсивностей и числа квантов. Генерация волн на разностной и суммарной частотах в среде с квадратичной нелинейностью. Биения амплитуд, быстрые и медленные моды. Распадная неустойчивость высокочастотных волн. Параметрическое усиление низкочастотных волн. Принцип перестройки частоты.										
Тема 18. Самовоздействие волновых пакетов и пучков. Нелинейная квазиоптика. Нелинейная геометрическая оптика. Метод безабберационного приближения. Дифракция волн в нелинейной среде. Самовоздействие волновых пучков. Самофокусировка света. Волноводное распространение пучков. Обращение волнового фронта.	6	2				1	3	2	1	3
Тема 19. Случайные процессы и их характеристики. Основные модели случайных процессов. Случайные величины и процессы,	4	2					2	2		2

способы их описания. Стационарный случайный процесс. Статистическое усреднение и усреднение во времени. Эргодичность. Измерение вероятностей и средних значений. Корреляционные и спектральные характеристики стационарных случайных процессов. Теорема Винера-Хинчина. Белый шум и другие примеры спектров и корреляционных функций. Модели случайных процессов: гауссовский процесс, узкополосный стационарный шум, импульсные случайные процессы, дробовой шум.										
Тема 20. Шумовые колебания. Флуктуационные уравнения. Отклик линейной системы на шумовые воздействия; функция Грина, интеграл Дюамеля. Действие шума на колебательный контур, фильтрация шума. Нелинейные преобразования (умножения частоты и амплитудное детектирование узкополосного шума). Марковские и диффузионные процессы. Уравнение Фоккера-Планка. Броуновское движение. Флуктуационно-диссипационная	4	2					2	2		2

теорема. Тепловой шум; классический и квантовый варианты формулы Найквиста. Тепловое излучение абсолютно черного тела.										
Тема 21. Случайные поля и волны. Случайные поля. Пространственная и временная когерентность. Дифракция случайных волн. Теорема Ван Циттерта-Цернике. Дифракция регулярной волны на случайном фазовом экране. Тепловое электромагнитное поле. Теорема взаимности. Рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Рассеяние волн на шероховатой поверхности. Понятие об обратной задаче рассеяния. Борновское приближение, метод малых возмущений и метод плавных возмущений. Взаимодействие случайных волн. Генерация второй оптической гармоники, самофокусировка и самомодуляция частично когерентных волн. Преобразование спектров шумовых волн в нелинейных средах без дисперсии.	6	2				1	3	2	1	3

Промежуточная аттестация: <i>допуск к кандидатскому экзамену</i>	8					4	4		4	4
Итого	108	46				8	54	44	10	54

8. Образовательные технологии

Используемые формы и методы обучения: лекции и семинарские занятия, самостоятельная работа аспирантов.

В процессе преподавания дисциплины преподаватель использует как классические формы и методы обучения (лекции и семинарские занятия), так и активные методы обучения.

При проведении лекционных занятий преподаватель использует при необходимости аудиовизуальные, компьютерные и мультимедийные средства обучения, а также демонстрационные и наглядно-иллюстрационные (в том числе раздаточные) материалы.

9. Учебно-методические материалы для самостоятельной работы по дисциплине (модулю): аспирантам предоставляется программа курса, план занятий и задания для самостоятельной работы, презентации к лекционным занятиям.

10. Ресурсное обеспечение:

Основная литература

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Том VIII. Электродинамика сплошных сред. М.: Физматлит, 2016.
2. Мигулин В.В., Медведев В.И., Мустель Е.Р., Парыгин В.Н. Основы теории колебаний. М.: Наука, 1988.
3. Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Основы теории колебаний и волн. М.: Наука, 1987.
4. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. Линейные и нелинейные волны. М.: Ленанд, 2015.
5. Карлов Н.В., Кириченко Н.А. Колебания, волны, структуры. - М.: Физматлит, 2001.
6. Саввин В.Л. Генерация и усиление микроволн. М.: Физический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова, 2015.
7. Кайно Г. Акустические волны. Устройства, визуализация и аналоговая обработка сигналов. М.: Мир, 1990.
8. Моисеев Н.Н. Асимптотические методы нелинейной механики. М.: Наука, 1981.
9. Никольский В.В., Никольская Т.И. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Наука, 1989.
10. Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. М.: Радио и связь, 1991.
11. Цейтлин Н. М. Антенная техника и радиоастрономия. М.: Радио и связь, 1976.
12. Рыскин Н.М., Трубецков Д.И. Нелинейные волны. М.: Ленанд, 2017.
13. Саввин В.Л. Микроволновая электродинамика. М.: Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, 2014.

Дополнительная литература

1. Ярив А., Юх П. Оптические волны в кристаллах. М.: Мир, 1987.
2. Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. М.: Наука, 1981.
3. Зельдович Я.Б. Теория ударных волн и введение в газодинамику. М.: Ленанд, 2014.
4. Пименов Ю.В., Вольман В.И., Муравцов А.Д. // Техническая электродинамика. М., Радио и связь, 2000.
5. Саввин В.Л. Микроволны в линиях передачи. М.: Физический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова, 2013.
6. Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний. М.: Наука, 1981.

7. Заславский Г.М., Сагдеев Р.З. Введение в нелинейную физику: От маятника до турбулентности и хаоса. М.: Наука, 1988.
8. Боголюбов Н.Н., Митропольский Ю.А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. М.: Наука, 1974.
9. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 1: Случайные процессы. М.: Наука, 1976.
10. Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 2: Случайные поля. М.: Наука, 1978.
11. Гауер Дж. Оптические системы связи. М.: Радио и связь, 1989.
12. Бахрах Л.Д., Кременецкий С.Д. Синтез излучающих систем. М.: Радио и связь, 1974.
13. Балакший В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985.
14. Качмарек Ф. Введение в физику лазеров. М.: Мир, 1981.
15. Вайнштейн Л.А., Солнцев В.А. Лекции по сверхвысокочастотной электронике. М.: Сов. радио, 1973.
16. Зверев В.А. Радиооптика. М.: Сов. радио, 1975.
17. Букингом М. Шумы в электронных приборах и системах. М.: Мир, 1986.
18. Карлов Н. В. Лекции по квантовой электронике. М.: Наука, 1983.
19. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Радио и связь, 1989.
20. Ландау Л. В., Лифшиц Е. М. Статистическая физика. Т. V, Ч. 1. М.: Наука, 1999.
21. Фейнберг Е. Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. М.: Наука, 1999.

11. Язык преподавания – русский.

12. Преподаватели:

1. к.ф.-м.н., доцент Г.А. Князев,
2. к.ф.-м.н., старший преподаватель М.В. Комиссарова,
3. к.ф.-м.н., доцент Н.А. Сухарева,
4. к.ф.-м.н., доцент С.А. Цысарь.

Фонды оценочных средств, необходимые для оценки результатов обучения

Образцы домашних заданий:

1. Из уравнений гидродинамики вязкой сплошной среды вывести волновое уравнение для плоских акустических волн в вязкой среде, дисперсионное соотношение и коэффициент затухания этих волн в среде с малой вязкостью.
2. Из уравнений гидродинамики вязкой сплошной среды вывести волновое уравнение для плоских сдвиговых волн в вязкой среде, дисперсионное соотношение и коэффициент затухания этих волн.
3. Из уравнений Максвелла вывести волновое уравнение для E и дисперсионное соотношение для электромагнитных волн в проводящей среде. Найти коэффициент преломления и коэффициент поглощения электромагнитных волн в такой среде.
4. Исходя из уравнения Гельмгольца вывести параболическое уравнение теории дифракции.
5. Вывести уравнения эйконала и переноса в нелинейной квазиоптике. Рассмотреть переход к линейной теории и к нелинейной геометрической оптике.
6. Для двух связанных LC - контуров с емкостной связью записать систему дифференциальных уравнений, найти собственные частоты.

7. Для регенеративного параметрического усилителя получить выражение для коэффициента усиления по мощности.
8. В случае эффекта Поккельса рассчитайте величину полуволнового напряжения для кристалла кварца заданной геометрии для нескольких вариантов взаимной ориентации волнового вектора света, напряженности электрического поля и осей кристалла.

Вопросы для промежуточной аттестации – зачета:

1. Что такое плоская волна? Что такое линейная среда? Формулировка принципа суперпозиции.
2. Уравнения гидродинамики вязкой сплошной среды. Что такое коэффициенты объемной и сдвиговой вязкости?
3. Формулы для объемной плотности энергии W и вектора плотности потока энергии S акустических возмущений. Связь W и S в волне, распространяющейся вдоль m .
4. Уравнения Максвелла в проводящей среде. Их физический смысл. Материальные уравнения в однородной изотропной среде.
5. Формулы для объемной плотности энергии W и вектора плотности потока энергии S электромагнитного излучения. Связь W и S в волне, распространяющейся вдоль m .
6. Физический смысл тангенса угла потерь для электромагнитного поля в проводящей среде.
7. Что такое дисперсия волн? Что такое волновой пакет? Что такое фазовая и групповая скорости? Связь фазовой и групповой скоростей в диспергирующей среде (формула Рэлея). Что такое нормальная и аномальная дисперсия?
8. Первое и второе приближения теории дисперсии: дисперсионное соотношение, условия применимости, уравнение для огибающей пакета и его общее решение.
9. Уравнение простых волн при малых числах Маха. Его решение.
10. Что такое ударная волна? Условие образования разрыва в простой волне. Длина образования разрыва.
11. Стационарное решение уравнения Бюргерса.
12. Стационарное решение уравнения Кортевега - де Вриза.
13. Условия применимости приближения заданного поля при исследовании генерация второй гармоники.
14. Что такое распадная неустойчивость волн в среде с квадратичной нелинейностью?
15. В чем проявляется самовоздействие волн?
16. Записать корреляционные функции, которые соответствуют следующим спектрам: прямоугольному низкочастотному, гауссовскому, треугольному, гладкому («белому» шуму).
17. Уравнение Фоккера-Планка и его стационарное решение.
18. Колебательные системы с несколькими степенями свободы. Парциальные частоты, собственные частоты, нормальные частоты.
19. Что такое странный аттрактор? Приведите примеры колебательных систем, допускающих хаотический режим колебаний.
20. Запишите уравнение Рамана-Ната. Как выглядят его решения в случае режимов дифракции Брэгга и Рамана-Ната?
21. Какие линейные магнитооптические эффекты бывают, в чем их особенность?

**Методические материалы
для проведения процедур оценивания результатов обучения**

Зачет проходит по билетам, включающем 4 вопроса. Уровень знаний аспиранта по каждому вопросу на «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно». В случае если на все вопросы был дан ответ, оцененный не ниже чем «удовлетворительно», аспирант получает общую оценку «зачтено».

Шкала оценивания знаний, умений и навыков

Результат освоения дисциплины	Критерии оценивания знаний, умений и навыков			
	2/ не зачтено	3/ зачтено	4/ зачтено	5/ зачтено
Знания	Отсутствие знаний основных законов радиофизики	В целом успешные, но не систематические знания основных законов радиофизики	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы знания основных законов радиофизики	Успешные и систематические знания основных законов радиофизики
Умения	Отсутствие умения применять основные законы радиофизики для решения научных задач	В целом успешное, но не систематическое умение применять основные законы радиофизики для решения научных задач	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение применять основные законы радиофизики для решения научных задач	Успешное и систематическое умение применять основные законы радиофизики для решения научных задач
Навыки	Отсутствие/фрагментарное владение навыками решения научных задач в области радиофизики	В целом успешное, но не систематическое владение навыками решения научных задач в области радиофизики	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы владение навыками решения научных задач в области радиофизики	Успешное и систематическое владение навыками решения научных задач в области радиофизики