

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный
исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»
(ИПФ РАН)



УТВЕРЖДАЮ:

Зам. директора по научной работе

М.Ю. Глявин

« 11 » апреля 2022 г.

Программа вступительного экзамена по специальной дисциплине

Уровень образования:

высшее образование – подготовка кадров высшей квалификации

Группа научных специальностей:

1.3. Физические науки

Научные специальности:

1.3.4. Радиоп физика

1.3.7. Акустика

1.3.9. Физика плазмы

1.3.19. Лазерная физика

Оглавление

Раздел 1. «Квантовая механика».....	2
Раздел 2. «Колебания и волны, оптика».....	5
Раздел 3. «Теория колебаний и волн».....	10
Раздел 4. «Электродинамика».....	12
Раздел 5. «Акустика океана».....	18
Раздел 6. «Механика сплошных сред».....	21
Раздел 7. «Физика плазмы».....	23
Раздел 8. «Физика лазеров».....	27
Раздел 9. «Физическая оптика».....	31

Раздел 1 «Квантовая механика»

1. Пределы применимости классической механики. Переход к квантовому описанию.

Волновые свойства квантовых частиц. Отказ от классического детерминизма. Постоянная Планка.

2. Операторы физических величин. Основные представления теории линейных операторов в гильбертовом пространстве.

Общие свойства волновых функций и операторов в квантовой механике. Принцип суперпозиции. Эрмитовость операторов. Основные теоремы. Оператор импульса, момента количества движения и четности.

3. Уравнение Шредингера. Сохранение вероятности.

Нестационарное и стационарное Уравнение Шредингера. Общая характеристика. Вывод уравнения непрерывности из уравнения Шредингера. Вектор плотности потока вероятности. Интегралы движения.

4. Решение стационарного уравнения Шредингера в одномерных потенциалах. Общие свойства одномерного движения.

Прямоугольная квантовая яма. Состояния с энергией $E > 0$ и $E < 0$. Прямоугольный квантовый барьер. Коэффициенты прозрачности и отражения. Гармонический осциллятор (собственные функции и спектр). Решение задачи об осцилляторе алгебраическим методом. Операторы рождения и уничтожения.

5. Эволюция волновых пакетов. Функция Грина нестационарного уравнения Шредингера.

Функция Грина свободной частицы. Эволюция гауссовского волнового пакета. Время распыливания. Когерентные состояния гармонического осциллятора.

6. Движение в центральном поле. Атом водорода. Движение заряженной частицы в магнитном поле.

Интегралы движения в центральном поле. Классификация состояний. Разделение переменных. Движение в кулоновском поле. Волновые функции и спектр.

Квантование Ландау. Уровни Ландау и волновые функции.

7. Электростатический и магнитостатический эффекты Аронова-Бома.

Схема экспериментов по наблюдению электростатического и магнитостатического эффектов Аронова – Бома. Расчет сдвига фазы. Особая роль электромагнитных потенциалов в квантовой механике.

8. Работа Эйнштейна – Розена – Подольского. Квантовая телепортация.

Парадокс Эйнштейна-Розена Подольского. Теорема Белла.

9. Теория представлений. Матричная форма квантовых уравнений.

Импульсное представление. Матричная форма операторов. Унитарные преобразования.

10. Представление Шредингера и представление Гайзенберга.

Два способа писания эволюции квантовых состояний. Волновые функции и операторы. Гайзенберговские уравнения движения. Гармонический осциллятор в представлении Гайзенберга.

11. Приближенные методы квантовой механики: стационарная теория возмущений, нестационарная теория возмущений, квазиклассическое приближение, вариационный метод Ритца.

12. Квантование электромагнитного поля. Фотоны.

13. Спин.

Матрицы Паули. Собственные векторы и собственные значения. Преобразование волновых функций при поворотах системы координат. Спиноры.

14. Уравнение Паули. Динамика спина в магнитном поле. Спиновый резонанс.

Решение уравнения Паули для частицы со спином $\frac{1}{2}$ в постоянном магнитном поле. Прецессия спина. Спиновый резонанс в переменном магнитном поле.

15. Тождественность частиц. Фермионы и бозоны.

Тождественность квантовых частиц. Симметрия к перестановке частиц. Многочастичные волновые функции фермионов и бозонов. Принцип Паули.

16. Обменное взаимодействие. Молекула водорода. Атом гелия.

Природа обменного взаимодействия. Расчет основного состояния молекулы водорода по методу Гайтлера-Лондона. Основное и первое возбужденное состояние атома гелия.

17. Теория рассеяния. Борновское приближение.

Амплитуда рассеяния. Расчет амплитуды рассеяния в борновском приближении. Условия применимости.

18. Релятивистская квантовая механика. Уравнение Дирака.

Уравнение Клейна-Гордона-Фока. Уравнение Дирака. Матрицы Дирака. Определение плотности вероятности. Решение уравнения Дирака для свободной частицы. Позитроны. Решение уравнения Дирака в постоянном магнитном поле.

19. Релятивистские поправки к уравнению Шредингера. Тонкая структура спектра атома водорода. Спин-орбитальное взаимодействие.

Релятивистские поправки к уравнению Шредингера первого и второго порядка по v/c . Тонкая структура спектра атома водорода. Эффекты спин-орбитального взаимодействия в твердом теле.

Литература:

1. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Квантовая механика (нерелятивистская теория), М. Наука, 2000 г. (15 экз.)
2. Елютин, Кривченков, Квантовая механика, М. Наука, 2001 г. (20 экз.)
3. В.В. Балашов, В.К. Долинов, Курс квантовой механики, изд МГУ, 1982г. (15 экз.)
4. В.М. Галицкий, Б.М. Карнаков, В.И. Коган. Задачи по квантовой механике, М. Наука, 1992 г. (13 экз.)
5. Учебники по квантовой механике на CD (всего 20 шт.), изд. Регулярная и хаотическая динамика.
6. D.J. Griffiths, Introduction to Quantum Mechanics, Prentice Hall, 1995.
7. J-L. Basdevant, J. Daliband. Quantum Mechanics. Springer. 2002.

Вопросы для контроля

- 1) Границы применимости классической механики и электродинамики.
- 2) Операторы физических величин в квантовой механике. Основные свойства операторов.
- 3) Оператор Гамильтона. Дифференцирование операторов по времени.
- 4) Законы сохранения в квантовой механике (интегралы движения).
- 5) Оператор импульса.
- 6) Оператор момента импульса.
- 7) Четность состояний в квантовой механике. Сохранение четности.
- 8) Стационарное и нестационарное уравнение Шредингера.
- 9) Уравнение непрерывности.
- 10) Прямоугольная потенциальная яма. Стационарные состояния.
- 11) Прямоугольная потенциальная яма и барьер. Коэффициент прозрачности.
- 12) Электронные состояния в низкоразмерных полупроводниковых структурах. Квантовые ямы, нити, точки.
- 13) Гармонический осциллятор. Волновая функция и спектр.
- 14) Гармонический осциллятор в представлении операторов рождения и уничтожения.
- 15) Общие свойства одномерного движения.
- 16) Изменение квантовых состояний во времени. Функция Грина свободной частицы.
- 17) Атом водорода.
- 18) Токи в атоме. Орбитальный магнитный момент.
- 19) Электрон в магнитном поле.
- 20) Электростатический и магнитостатический эффекты Аронова–Бома.
- 21) Соотношение неопределенностей.
- 22) Импульсное представление.
- 23) Матричная формулировка квантовой механики.
- 24) Представление Шредингера и Гейзенберга.
- 25) Работа Эйнштейна-Подольского-Розена.
- 26) Квантовая телепортация.
- 27) Стационарная теория возмущений для систем без вырождения.
- 28) Стационарная теория возмущений при наличии вырождения.
- 29) Приближение почти свободных электронов.
- 30) Возмущение, зависящее от времени.
- 31) Вероятность перехода в непрерывный спектр под влиянием периодического возмущения.
- 32) Соотношение неопределенности для энергии и времени.
- 33) Квантование электромагнитного поля. Фотоны.
- 34) Взаимодействие поля с веществом. Понятие о спонтанном и вынужденном излучении. Правила отбора.
- 35) Квазиклассическое приближение. Волновые функции. Правила квантования Бора-Зоммерфельда. Квазиклассическое квантование в стохастических бильярдах.
- 36) Вариационный метод в квантовой механике.

- 37) Спин.
- 38) Прецессия спина в магнитном поле. Спиновый резонанс.
- 39) Управление квантовыми гейтами. Понятие о квантовых вычислениях.
- 40) Тожественность частиц. Волновые функции фермионов и бозонов.
- 41) Понятие об обменном взаимодействии. Системы двух частиц со спином $1/2$.
- 42) Уравнение Клейна-Гордона-Фока.
- 43) Уравнение Дирака. Спин в теории Дирака.
- 44) Решение уравнения Дирака для свободной частицы. Позитрон.
- 45) Релятивистские поправки в спектре атома водорода.
- 46) Решение уравнения Дирака в однородном магнитном поле

Раздел 2 «Колебания и волны, оптика»

1. Основные понятия, связанные с гармоническими колебаниями, линейный осциллятор.

Скалярное гармоническое колебание: его основные характеристики. Уравнение гармонического осциллятора, его решение, интеграл энергии. Примеры систем, свободные малые колебания которых описываются уравнением линейного осциллятора. Сложение двух синхронных скалярных гармонических колебаний; биения. Метод векторных диаграмм. Метод комплексных амплитуд, импеданс, эффективные ток и напряжение, активная и реактивная мощность. Сложение двух взаимно ортогональных векторных колебаний. Фигуры Лиссажу. Принцип развертки при исследовании колебаний; синхронизация. Фазовая плоскость. Фазовый «портрет» гармонического осциллятора. Фазовый портрет нелинейного осциллятора на примере физического маятника.

2. Движение гармонического осциллятора под действием внешней периодической силы.

Движение гармонического осциллятора под действием внешней импульсной периодической силы. Стационарные периодические колебания с частотой вынуждающей силы; зависимость амплитуды стационарных колебаний от частоты вынуждающей силы, резонансы. Гармонический осциллятор с затуханием под действием внешней импульсной периодической силы. Амплитуда установившихся колебаний при резонансе и процесс установления колебаний из состояния покоя. Зависимость амплитуды установившихся колебаний от частоты вынуждающей силы; основной и кратные резонансы. Линейный осциллятор без затухания под действием внешней гармонической силы. Частотные зависимости амплитуды и фазы вынужденных колебаний. Колебания при «включении» гармонической силы в начальный момент времени (резонансный и нерезонансный случаи). Вынужденные колебания линейного осциллятора с затуханием под действием внешней гармонической силы (резонансный и нерезонансный случаи). Резонансные характеристики электрического LC контура с затуханием. Процесс установления вынужденных колебаний в линейном осцилляторе с затуханием при включении внешней гармонической силы.

3. Параметрические системы.

Параметрическая неустойчивость. Теорема Флоке для уравнения Хилла. Уравнение Матье. Исследование параметрической неустойчивости в первой зоне Матье при слабом параметрическом воздействии. Влияние линейного затухания. Маятник Капицы. Усредненное уравнение движения на горизонтальной поверхности при линейных синусоидальных

колебаниях точки подвеса физического маятника; условия разделения движений на «быстрые» и «медленные». Усредненный высокочастотный потенциал. Маятник Капицы при вертикально и горизонтально осциллирующей точке подвеса; фазовые портреты «медленных» движений при разных соотношениях между параметрами; осциллограммы колебаний. ВКБ приближение и адиабатические инварианты. Энергетические соотношения на примере электрического LC контура с медленно изменяющимся расстоянием между пластинами плоского конденсатора. Адиабатический инвариант и ВКБ приближение для математического маятника с медленно меняющейся длиной нити подвеса.

4. Релаксационные колебания, автоколебания, предельный цикл.

Релаксационные колебания в генераторе с неоновой лампочкой и в схеме с двухпозиционным регулятором температуры. Автоколебания в маятниковых часах с идеализированной характеристикой; предельный цикл. Маятник Фроуда – механическая система с отрицательным дифференциальным трением; устойчивый и неустойчивый фокусы на фазовой плоскости. Понятие об отрицательной дифференциальной проводимости.

5. Системы связанных линейных осцилляторов.

Два связанных линейных осциллятора. Парциальные и нормальные частоты. Структура простейших нормальных колебаний; нормальные координаты. «Перекачка» колебаний между двумя идентичными осцилляторами со слабой связью. Вынужденные колебания в системе связанных осцилляторов при воздействии гармонической силы на один из них. Амплитудно-частотные характеристики, резонансы, динамическое демпфирование. Общие свойства свободных колебаний в системе N связанных линейных осцилляторов.

6. Цепочки идентичных связанных линейных осцилляторов; переход к непрерывному описанию.

«Крупномасштабные» колебания в одномерных «длинных» цепочках идентичных связанных линейных осцилляторов; переход к непрерывному описанию. Собственные поперечные колебания массивной натянутой струны с закрепленными и свободными концами. Одномерное волновое уравнение. Собственные продольные колебания упругого стержня с закрепленными и свободными концами.

7. Одномерные волны, плоские волны.

Решение одномерного волнового уравнения в виде бегущих волн. Отражение поперечных волн на «тяжелой» натянутой струне и продольных волн в упругом стержне от закрепленного и свободного концов; согласующие граничные условия. Плотность энергии, поток энергии при распространении продольных волн в упругом стержне; вектор Умова. Продольные волны в газовом столбе, изотермический и адиабатический звук.

8. Гармонические волны в однородной среде.

Гармонические волны в однородной среде. Интерференция гармонических волн. Стоячая плоская волна. Интерференция плоских гармонических волн, распространяющихся под углом друг к другу.

9. Плоские электромагнитные волны в однородной среде.

Структура электрического и магнитного полей в плоских электромагнитных волнах, волновое сопротивление среды. Энергетические соотношения в плоских электромагнитных волнах, вектор Пойнтинга. Поляризация плоских электромагнитных волн. Двойколучепреломление, вращение плоскости поляризации, дихроизм. Цилиндрические

электромагнитные волны. Излучение монохроматических электромагнитных волн элементарным электрическим (магнитным) диполем, сопротивление излучения.

10. Излучение волн, цилиндрические и сферические волны.

Трехмерное волновое уравнение. Решения трехмерного волнового уравнения в виде плоских, сферических и цилиндрических волн. Сходящиеся и расходящиеся цилиндрические и сферические волны, связь с источниками. Цилиндрические электромагнитные волны. Излучение монохроматических электромагнитных волн элементарным электрическим (магнитным) диполем, сопротивление излучения. Диаграмма направленности сложных излучателей в виде одномерных двумерных и трехмерных антенных решеток

11. Исторический обзор развития представлений о природе света.

Геометрическая (лучевая) оптика, ее экспериментальные успехи, законы Снеллиуса. Трудности корпускулярной и волновой концепций природы света. Принцип Гюйгенса построения волновых фронтов. Преломление света с точки зрения корпускулярной и волновой концепций. Экспериментальные доказательства волновой природы света (абсолютные измерения скорости света в веществе, интерференция). Диапазон длин волн и частот световых волн. Экспериментальное доказательство поперечности световых волн. Электромагнитная природа световых волн.

12. Характеристики света, излучаемого естественными источниками.

Модель излучающего атома, как возбужденного линейного осциллятора с радиационным затуханием. Цуг световых волн, излучаемый отдельным атомом. Квазимонохроматическая электромагнитная волна. Характеристики света, излучаемого большим количеством идентичных атомов, хаотически расположенных в пространстве и возбуждаемых в случайные моменты времени; характеристики цугов результирующего суммарного излучения. Временная и пространственная когерентность светового излучения. Поляризация света, излучаемого естественными источниками; зависимость от соотношения между временным масштабом когерентности света и временем усреднения оптического прибора. Понятие неполяризованного светового излучения. Измерение поляризации светового излучения.

13. Интерференция световых волн.

Интерференция света от двух независимых естественных источников, невозможность ее наблюдения при большом времени усреднения оптического измерительного прибора. Условия и способы наблюдения интерференции света от естественных источников. Интерференционные картины при интерференции сферических, цилиндрических и плоских волн.

14. Принцип Гюйгенса-Френеля и его использование в задачах дифракции.

Принцип Гюйгенса-Френеля. Связь между характеристиками вторичных источников и первичной волны. Приближенный способ построения первичной волны при наличии поглощающих экранов. Дифракция Фраунгофера при нормальном падении плоской волны на дифракционную решетку; условия реализации и способ наблюдения. Дифракционная решетка как измерительный прибор. Дифракция плоской волны вблизи прямого края полубесконечного поглощающего экрана. Геометрический метод нахождения распределения амплитуды дифрагированной волны с использованием спирали Корню. Дифракция плоской волны на щели в бесконечном плоском поглощающем экране при нормальном падении; зона геометрической оптики, зона дифракции Френеля, зона дифракции Фраунгофера. Дифракция Фраунгофера при нормальном падении плоской волны на круглое отверстие в бесконечном плоском

поглощающем экране, зоны Френеля. «Светлое пятно Араго». Фокусировка плоской волны с помощью простой зонной пластинки; фокусировка при плавной фазовой коррекции с помощью оптической линзы

Литература:

1. *Савельев И.В.* Курс общей физики в 3-х томах. 4-е изд, испр. и доп., М.: Наука, 1970. Том 1 «Механика», 508с. Том 2 «Электричество», 442с.
2. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики. Том 4: Оптика. Учебное пособие для вузов. Изд. 3-е. – М.: Физ.Мат.Лит, 2005.
3. *Горелик Г.С.*, Колебания и волны, 2 изд., М., 1959
4. *Оррир Дж.* Физика в 2-х томах, том 1, М.: Мир, 1981.
5. *Крауфорд Ф.* «Волны». Берклеевский курс физики. Том III. Москва, «Наука», 1976.
6. *Рабинович М.И., Трубецков Д.И.* «Введение в теорию колебаний и волн». М. «Наука», 1984.
7. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики, М. «Наука», 1970.

Вопросы для контроля

- 1) Основные характеристики скалярного гармонического колебания.
- 2) Уравнение гармонического осциллятора, его решение, интеграл энергии.
- 3) Сложение двух синхронных скалярных гармонических колебаний; биения; метод векторных диаграмм, метод комплексных амплитуд.
- 4) Сложение двух взаимно ортогональных векторных колебаний, фигуры Лиссажу, принцип развертки.
- 5) Фазовая плоскость, фазовый «портрет» гармонического осциллятора, фазовый портрет нелинейного осциллятора на примере физического маятника.
- 6) Линейный осциллятор с затуханием, частота и декремент слабозатухающих колебаний, добротность, апериодические колебания.
- 7) Движение гармонического осциллятора под действием внешней периодической силы, резонанс, добротность.
- 8) Уравнение Матье, параметрическая неустойчивость.
- 9) Маятник Капицы, фазовый портрет при вертикальных и горизонтальных колебаниях точки подвеса, высокочастотный потенциал.
- 10) ВКБ приближение и адиабатические инварианты.
- 11) Автоколебания в маятниковых часах с идеализированной характеристикой; предельный цикл.
- 12) Понятие об отрицательной дифференциальной проводимости.
- 13) Парциальные и нормальные частоты в системе двух связанных линейных осцилляторов, структура нормальных колебаний, нормальные координаты.
- 14) Вынужденные колебания в системе связанных осцилляторов, резонансы, динамическое демпфирование.
- 15) Общие свойства свободных колебаний в системе N связанных линейных осцилляторов.
- 16) Одномерное волновое уравнение, собственные поперечные колебания массивной натянутой струны с закрепленными и свободными концами, собственные продольные колебания упругого стержня с закрепленными и свободными концами
- 17) Решение одномерного волнового уравнения в виде бегущих волн.

- 18) Плотность энергии и поток энергии при распространении продольных волн в упругом стержне; вектор Умова.
- 19) Продольные волны в газовом столбе, изотермический и адиабатический звук.
- 20) Трехмерное волновое уравнение; решения трехмерного волнового уравнения в виде плоских, сферических и цилиндрических волн
- 21) Гармонические волны в однородной среде, интерференция гармонических волн, стоячая плоская волна.
- 22) Структура электрического и магнитного полей в плоских электромагнитных волнах, волновое сопротивление среды.
- 23) Энергетические соотношения в плоских электромагнитных волнах, вектор Пойнтинга.
- 24) Поляризация плоских электромагнитных волн; двойколучепреломление, вращение плоскости поляризации, дихроизм.
- 25) Излучение монохроматических электромагнитных волн элементарным электрическим (магнитным) диполем, сопротивление излучения.
- 26) Геометрическая (лучевая) оптика, ее экспериментальные успехи, законы Снеллиуса.
- 27) Трудности корпускулярной и волновой концепций природы света; принцип Гюйгенса построения волновых фронтов, преломление света с точки зрения корпускулярной и волновой концепций.
- 28) Экспериментальные доказательства волновой природы света; экспериментальное доказательство поперечности световых волн, электромагнитная природа световых волн.
- 29) Естественные источники света, модель излучающего атома, как возбужденного линейного осциллятора с радиационным затуханием, цуг световых волн, излучаемый отдельным атомом, квазимонохроматическая электромагнитная волна.
- 30) Характеристики света, излучаемого большим количеством идентичных атомов, хаотически расположенных в пространстве и возбуждаемых в случайные моменты времени; временная и пространственная когерентность светового излучения.
- 31) Поляризация света, излучаемого естественными источниками; зависимость от соотношения между временным масштабом когерентности света и временем усреднения оптического прибора.
- 32) Условия наблюдения интерференции света от естественных источников.
- 33) Принцип Гюйгенса-Френеля. Приближенный способ построения первичной волны при наличии поглощающих экранов.
- 34) Дифракция Фраунгофера при нормальном падении плоской волны на дифракционную решетку.
- 35) Дифракция плоской волны вблизи прямого края полубесконечного поглощающего экрана.
- 36) Дифракция плоской волны на щели в бесконечном плоском поглощающем экране; зона геометрической оптики, зона дифракции Френеля, зона дифракции Фраунгофера.
- 37) Дифракция Фраунгофера при нормальном падении плоской волны на круглое отверстие в бесконечном плоском поглощающем экране.
- 38) Распределение освещенности вдоль оси, перпендикулярной плоскости экрана и проходящей через центр круглого отверстия, зоны Френеля.
- 39) «Светлое пятно Араго». Влияние неровностей краев экрана на дифракционную картину.
- 40) Фокусировка плоской волны с помощью простой зонной пластинки, фокусировка при плавной фазовой коррекции с помощью оптической линзы.

Раздел 3. «Теория колебаний и волн»

1. Линейный осциллятор

Фазовый портрет. Резонанс. Резонансное поглощение. Действие непериодической силы. Связанные осцилляторы. Нормальные и парциальные частоты.

2. Нелинейный осциллятор

Фазовая плоскость. Типы состояний равновесия. Предельный цикл. Грубые динамические системы. Индекс Пуанкаре. Метод Ван-дер-Поля.

3. Параметрический резонанс в линейных системах

Теорема Флоке. Точечные отображения. Зоны неустойчивости. Метод ВдП.

4. Адиабатические инварианты

Линейный осциллятор с медленно изменяющимися параметрами. Метод ВдП. Переменные действие-угол. Геометрический смысл а.и.. Точность сохранения а.и.

5. Системы с быстро изменяющимися параметрами

Усредненная пондеромоторная сила. Связь с теорией адиабатических инвариантов. Точность усредненного описания.

6. Резонанс в нелинейных системах

Спектр установившихся колебаний Устойчивость состояния равновесия. Явление гистерезиса при медленном изменении амплитуды силы.

7. Периодические автоколебания

Генератор Ван-дер-Поля. Эффект захвата частоты. Релаксационные автоколебания. Быстрые и медленные движения.

8. Метод Ван-дер-Поля

Общая схема метода. Условия применимости. Обоснование сходимости. Оценка точности.

9. Стохастичность в динамических системах

Экспериментальные признаки стохастичности. Сигнал, спектр, корреляционная функция. Точечные отображения для систем с одной степенью свободы. Отображение Фейгенбаума. Удвоение периода. Инвариантная мера. Эргодичность. «Динамическая» диффузия. Системы с 32 степенями свободы. Элементы «КАМ»-теории. Глобальная стохастичность. Критерий перекрытия резонансов. Критерий многопоточности. ЭФП - приближение на примере стандартного отображения.

10. Линейные системы

Цепочки связанных осцилляторов; функции Блоха; дисперсионные соотношения, длинноволновое приближение; фазовая и групповая скорость; расплывание волновых пакетов. Абсолютная и конвективная неустойчивости (неустойчивость гравитирующего газа, модуляционная неустойчивость, пучковая неустойчивость).

11. Трехволновые взаимодействия

Условия синхронизма. Распадные и нераспадные спектры. Укороченные уравнения. Соотношения Менли-Роу. Распадная и взрывная неустойчивости.

12. Множественные синхронизмы

Ударные волны. Волны Римана. Определение координат и времени образования разрывов.

13. Структура фронта ударной волны

Уравнение Бюргерса. Уравнение Кортевега-де Вриза (КДВ). Конкуренция вязкости, дисперсии, нелинейности. Структура фронта «бесстолкновительной» ударной волны.

14. Стационарные волны (кинки и солитоны)

Солитон нелинейного уравнения Шредингера (НУШ). Устойчивость КДВ и НУШ солитонов. Второй метод Ляпунова. Неравенство Соболева.

15. Взаимодействие солитонов

Метод Уизема.

15. Интегрируемость в нелинейных системах

Интегрируемость гамильтоновых сосредоточенных систем. Метод Лэкса. Оценка полного числа КДВ солитонов по начальным условиям. Отыскание N-солитонных решений КДВ уравнения методом преобразования Дарбу.

16. Самофокусировка волн

Качественная модель процесса. Поперечная неустойчивость пучков большой мощности (филаментация). Однородные каналы. Критическая мощность самофокусировки. Метод моментов. Оценка длины самофокусировки. Оценка критической мощности. Метод Уизема. Безабберационное описание процесса самофокусировки.

Литература:

1. *А. А. Андронов...* «Теория колебаний».
2. *М. И. Рабинович, Д. И Трубецков.* «Введение в теорию колебаний и волн».
3. *Р. З. Сагдеев, Г. М. Заславский.* «Физика колебаний».
4. *Г. Шустер.* «Детерминированный хаос».
5. *Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц.* «Механика»
6. *В.И.Арнольд* «Математические методы классической механики»
7. *Либерман, Лихтенберг* «Регулярная и стохастическая динамика»
8. *V.V.Matveev, M.A.Salle* “Darboux Transformation and Solitons”, Springer-Verlag, 1191.
9. «Сборник задач по теории колебаний» под редакцией Л.В.Постникова и В.И.Королева, М., Наука, 1978.

Вопросы для контроля

- 1) Бифуркационная диаграмма линейного осциллятора
- 2) основные типы состояний равновесия на фазовой плоскости
- 3) Резонансные потери
- 4) Зависимость периода и спектра колебаний нелинейного осциллятора от амплитуды.
- 5) Оценка порогов возникновения параметрической неустойчивости в зависимости от номера зоны.
- 6) Точность сохранения адиабатического инварианта линейного осциллятора с медленно изменяющейся частотой.
- 7) Оценить глубину проникновения поперечной электромагнитной волны в плавнонеоднородную среду с кубической нелинейностью.
- 8) Найти зоны возможной генерации колебаний монотрона в зависимости от энергии электронов на входе.

- 9) Почему при движении в высокочастотных полях возможно удержание электронов усредненной пондеромоторной силой, а в статических электрических полях это невозможно.
- 10) Почему для системы связанных осцилляторов спектр нормальных частот всегда шире спектра парциальных частот.
- 11) Эффект Вина. Демпфирование колебаний
- 12) Эффект синхронизации двух связанных автогенераторов
- 13) Эффект гистерезиса вынужденных колебаний нелинейного осциллятора при медленном изменении частоты внешней силы.
- 14) Принцип «суперпозиции» эффектов в рамках метода Ван-дер-Поля
- 15) Динамическая модель броуновского движения.
- 16) Критерии глобальной стохастичности
- 17) Стохастическое ускорение заряженных частиц
- 18) Метод моментов в задаче о расплывании волновых пакетов.
- 19) Качественное объяснение специфики абсолютной и конвенктивной неустойчивости
- 20) Применение цепочек связанных осцилляторов при моделировании распределенных систем различной физической природы.
- 21) Трехволновые взаимодействия в системах с квадратичной нелинейностью
- 22) Общие свойства систем уравнений гиперболического типа.
- 23) Соотношения Менли-Роу. Распадная и взрывная неустойчивости.
- 24) Ударные волны в ферритах
- 25) Структура фронта ударной волны
- 26) Конкуренция дисперсии и нелинейности и солитоны
- 27) Устойчивость КДВ и НУШ солитонов.
- 28) Стационарная волна МКДВ уравнения
- 29) Метод Лэкса для КДВ- уравнения
- 30) Оценка числа солитонов по начальным условиям
- 31) Метод Уизема для теории возмущений
- 32) Метод преобразования Дарбу
- 33) Качественная модель процесса самофокусировки
- 34) Критическая мощность и филаментационная неустойчивость

Раздел 4 «Электродинамика»

1. Исторические справки.

Концепция электромагнитного поля, как результат «победы» теории близкодействия над теорией дальнего действия. Основные экспериментальные факты, которые легли в основу уравнений Максвелла. Ток смещения. Элементы векторного анализа, необходимые для прогресса в изучении электродинамики: дифференциальные операции первого и второго порядков, оператор "набла", основные тождества, интегральные теоремы, криволинейные системы координат.

2. Основные уравнения макроскопической электродинамики и общие свойства электромагнитных полей.

Уравнения Максвелла в дифференциальной и интегральной формах для полей, зарядов и токов в вакууме. Постулаты, связывающие э.-м. явления с механическими. Уравнения для средних макроскопических полей в среде. Материальные уравнения для различных сред. Ток и поляризация как результат воздействия полей на среду и как источник этих полей. Сторонние источники. Уравнение непрерывности для электрического заряда. Граничные условия для полей. Понятие поверхностных токов и зарядов. Граничные условия для плотности электрического тока. Принцип суперпозиции решений. Магнитные источники и принцип двойственности. Скаляры, векторы и псевдовекторы в уравнениях Максвелла. Обратимость уравнений во времени. Теорема Пойнтинга. Вектор Пойнтинга и понятие потока электромагнитной энергии. Плотность э.-м. энергии в среде и джоулевы потери. Максвелловский тензор натяжений. Импульс электромагнитного поля. Теорема единственности решения уравнений Максвелла.

3. Электростатика.

Уравнения электростатического поля. Скалярный потенциал. Уравнения Пуассона и Лапласа. Уравнение для потенциала в неоднородном диэлектрике. Граничные условия для потенциала на поверхностях диэлектриков и проводников. Источники электростатического поля. Особенности поля и потенциала вблизи точечных, линейных и поверхностных источников (заряд, диполь, двойной слой и т. д.). Обратная задача электростатики - отыскание распределения зарядов по заданному полю или потенциалу. Прямая задача электростатики. Функция Грина для безграничной однородной среды. Общее решение уравнения Пуассона. Упрощение решения отдельных задач на основании соображений симметрии. Постановка задач об отыскании функций Грина для задач Дирихле и Неймана. Поле произвольной системы зарядов на большом расстоянии от нее. Электрические мультиполи. Понятие дипольного и квадрупольного моментов. Теорема единственности решения прямой задачи электростатики. Теорема об отсутствии максимумов и минимумов потенциала в области, свободной от источников. Теорема взаимности. Линейные соотношения между потенциалами и зарядами проводников. Понятие емкости. Конструктивные методы (металлизация эквипотенциальных поверхностей, метод изображений для проводящей плоскости, проводящей сферы и диэлектрического полупространства, заполнение диэлектриком силовых трубок и областей между замкнутыми эквипотенциальными поверхностями). Метод разделения переменных. Частные решения уравнения Лапласа в декартовой и сферической системах координат. Задача о диэлектрическом шаре в однородном внешнем поле. Энергия электростатического поля. Представление в виде интеграла по области источников. Собственная и взаимная энергия различных подсистем. Энергия взаимодействия внешнего поля с точечным диполем. Энергия системы проводников (представление в виде квадратичных форм потенциалов или зарядов, связь с понятием емкости). Силы в электростатическом поле. Энергетический метод расчета обобщенных сил. Силы, действующие на заряд и диполь во внешнем поле. Связь между вариацией энергии и работой электрических сил в системе проводников с постоянными зарядами или постоянными потенциалами. Сведение объемных сил к поверхностным натяжениям.

4. Постоянные токи в проводящих средах.

Уравнения теории постоянных токов в проводящей среде. Граничные условия для плотности тока. Понятие и идеального изолятора, идеального проводника и идеального

электрода. Формальная аналогия с электростатикой, примеры ее использования для решения задач. Понятие сопротивления. Закон Джоуля-Ленца. Токи в квазилинейных проводниках. Законы Кирхгофа.

5. Магнитостатика.

Уравнения, описывающие магнитное поле постоянных токов. Векторный потенциал. Уравнение для векторного потенциала в однородной среде и его решение. Закон Био-Саварра-Лапласа. Поле произвольной системы замкнутых токов на большом расстоянии от нее. Магнитный дипольный момент. Поле магнитного диполя. Скалярный потенциал магнитного поля. Магнитный листок как эквивалент линейного контура с током. Аналогия между электростатическими и магнитостатическими полями как проявление принципа двойственности и основанные на ней примеры решения задач магнитостатики (шар в однородном поле, магнитное экранирование, отражение в полупространстве, заполнение магнетиком). Поля, создаваемые намагниченными телами. Замена намагниченности эквивалентными электрическими токами или фиктивными магнитными зарядами. Магнитное поле однородно намагниченного шара. Энергия и силы в магнитном поле. Представление энергии в виде интеграла по области источников. Энергия системы квазилинейных токов. Коэффициенты взаимной индукции и самоиндукции. Сила, действующая на элементы квазилинейного контура с током. Силы и вращающий момент, действующие на магнитный диполь. Плотность объемной силы и тензор натяжений в магнитном поле. Понятие о магнитопроводах.

6. Общие способы описания переменных электромагнитных полей.

Постановка задачи и различные приближения. Описание переменного э/-м. поля в общем случае. Дифференциальные уравнения второго порядка для э.-м. полей. Описание с помощью потенциалов. Градиентная инвариантность. Условие калибровки Лоренца. Волновые уравнения для потенциалов. Вектор Герца. Магнитные потенциалы. Гармонические процессы. Комплексная запись уравнений Максвелла. Комплексная диэлектрическая проницаемость. Связь комплексных полей с потенциалами. Возможность оперирования с произведениями комплексных векторов. Комплексная теорема Пойнтинга. Теорема единственности решения уравнений Максвелла для гармонических полей

7. Электродинамика квазистационарных процессов.

Квазистационарные процессы в проводящих средах. Задача о релаксации неоднородного магнитного поля в проводящей среде. Распределение переменных полей и токов в проводящем полупространстве. Скин-эффект.

Энергетические соотношения при скин-эффекте. Квазистационарные процессы в квазилинейных цепях с сосредоточенными параметрами. Возможность пренебрежения запаздыванием передачи взаимодействия и выделение зоны квазистатики.

8. Электромагнитные волны в однородных средах.

Однородные плоские волны в непоглощающей однородной среде. Ориентация векторов электрического и магнитного поля. Дисперсионное соотношение. Поляризация волны, длина волны, фазовая скорость. Поток энергии, переносимый плоской волной. Волны с комплексным волновым вектором в поглощающей среде. Простейшие случаи распространения плоских волн в однородных анизотропных средах. Понятие о нормальных волнах. Эффект Фарадея. Эффект Коттона-Муттона. Неоднородные плоские волны в непоглощающей среде (волны с комплексным волновым вектором). Построение неоднородных волн как суперпозиции плоских однородных волн.

Конструирование поля в волноводе и колебания в резонаторе из неоднородных плоских волн. Пример волна типа TE в прямоугольном волноводе. Двумерный электромагнитный волновой пучок. Представление в виде суперпозиции однородных плоских волн. Малоугловое (параксиальное) приближение (квазиоптический пучок). Уравнение поперечной диффузии и его решение. Зона геометрической оптики. Зона Френеля и диффузионная зона. Зона Фраунгофера. Среды с временной дисперсией. Связь между индукцией и напряженностью поля. Квазимонохроматические процессы. Энергия монохроматического поля в среде с временной дисперсией. Распространение импульсного сигнала в среде с временной дисперсией. Групповая скорость и скорость переноса энергии. Диффузионное уравнение для огибающей импульса.

9. Электромагнитные волны в неоднородных средах.

Отражение и преломление волн на плоской границе двух сред (формулы Френеля). Нормальное падение. Выражение коэффициента отражения через волновые импедансы.

Формула пересчета импеданса. Многослойное покрытие. Уравнение Риккати для импеданса в плоскостройной среде. Наклонное падение. Полное внутреннее отражение и угол Брюстера. Возникновение неоднородных волн при полном отражении. Отражение от хорошо проводящей поверхности и условие Леонтовича.

Волны в среде с плавно меняющимися параметрами. Приближение геометрической оптики. (ВКБ приближение). Лучевое описание поля в плавно неоднородных средах. Уравнение эйконала и уравнение переноса. Лучевые трубки. Изменение интенсивности в лучевой трубке. Нарушение приближения геометрической оптики вблизи каустики. Функция Эйри. Падение плоской волны на плоскостройную среду.

10. Электромагнитные волны в цилиндрических линиях передачи.

Волны TE, TM и TEM типов (общие выражения для полей через продольные компоненты вектора Герца). Поперечное волновое уравнение, поток энергии. Линии передачи с идеально проводящими границами. Граничные условия для поперечных волновых функций. Действительность поперечных волновых чисел. Условия существования главных (TEM) волн. Распространяющиеся и нераспространяющиеся волны, критические частоты, длина волны, фазовая и групповая скорости, вырождение волн. Волны в прямоугольном и круглом волноводах. Спектр поперечных волновых чисел, структура поля волн различных типов. Представление в виде суперпозиции однородных плоских волн (концепция Бриллюэна).

Описание главных волн в терминах напряжения и тока; телеграфные уравнения; Выражение фазовой скорости и волнового сопротивления через погонные параметры линии; главная волна в коаксиальной линии; отражение волны от скачка параметров линии и от нагрузки.

Затухание волн, вызванное потерями в среде, заполняющей волновод, и в стенках волновода.

Лемма Лоренца и теорема взаимности. Соотношения ортогональности и формулы для возбуждения волн в цилиндрических линиях передачи.

11. Электромагнитные колебания в полых резонаторах.

" Конструирование" собственных колебаний из волн в цилиндрических линиях передачи. Собственные частоты прямоугольного и цилиндрического резонатора.

Общая постановка задачи о собственных колебаниях в резонаторах. Равенство запасенной электрической и магнитной энергии. Спектр собственных частот в отсутствие

поглощения энергии и при наличии поглощения, обусловленного потерями в заполняющей среде и в стенках резонатора. Возбуждение полых резонаторов. Вихревые и потенциальные поля, формулы возбуждения, резонансные свойства.

12. Излучение заданных источников в однородной безграничной среде.

Функция Грина и общее решение неоднородного волнового уравнения, запаздывающие и опережающие решения, условия излучения, выражение для потенциала через интеграл по области источников.

Простейшая излучающая система - элементарный электрический диполь. Поля в квазистационарной и волновой зонах, диаграмма направленности, сопротивление излучения, излучение магнитного диполя.

Общее представление полей излучения произвольной системы токов в дальней зоне.

Вектор излучения как пространственная Фурье-компонента плотности тока. Диаграмма направленности, параметры передающих и приемных антенн.

Излучение токов (электрических и магнитных), текущих по плоскости.

13. Элементы теории дифракции электромагнитных волн.

Точные и приближенные решения. Простейшее решение - геометрическая оптика. Принцип Гюйгенса для скалярных и векторных полей. Принцип Гюйгенса-Френеля. Кирхгофовское приближение в задачах дифракции на отверстиях в экранах, метод физической оптики, понятие о геометрической теории дифракции.

Поперечное сечение рассеяния объекта (дифференциальное, полное, радиолокационное).

14. Квазиоптические линии передач и резонаторы.

Построение собственных волн в открытой линзовой линии. Описание полей в зеркальной линии.

Литература:

1. *И.Е. Тамм.* «Основы теории электричества», М., Наука, 1966.
2. *Дж. Джексон.* «Классическая электродинамика» М., Мир, 1965
3. *Л.А. Вайнштейн.* "Электромагнитные волны", М., Сов.Радио, 1957; Радио и Связь, 1988.
4. *Б.З. Каценеленбаум.* "Высокочастотная электродинамика", М., Наука, 1966.
5. *Л.М. Бреховских.* "Волны в слоистых средах", М., Наука, 1973.
6. *В.Л. Гинзбург.* "Распространение электромагнитных волн в плазме", М., Наука, 1967.
7. *В.Б. Гильденбург, М.А. Миллер.* «Сборник задач по электродинамике», М., Физматлит, 2001.
8. *Г.Т. Марков, Б.М. Петров, Г.П. Грудинская.* «Электродинамика и распространение радиоволн», М., Сов.Радио, 1979.
9. *М. Борн, Э. Вольф.* «Основы оптики», М., Наука, 1970.
10. *Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц.* «Теория поля», М., Физматлит, 2003.
11. *Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц.* «Электродинамика сплошных сред», М., Физматлит, 2001.
12. *Дж.А. Стрэттон.* «Теория электромагнетизма», ГИТТЛ, М.-Л., 1948.
13. *В. Пановский, М. Филиппс.* «Классическая электродинамика», М., ГИФМЛ, 1963.
14. *В. Смайт.* «Электростатика и электродинамика», 1954

15. Дж.К. Максвелл. «Трактат об электричестве и магнетизме», М., Наука, 1989.
16. В.В. Батыгин, И.Н.Топтыгин. «Современная электродинамика. Микроскопическая теория. Том 1, ИКИ, 2005.
17. И.Н. Топтыгин. «Современная электродинамика. Теория электромагнитных явлений в веществе». Том 2 , ИКИ, 2005.
18. В.В. Батыгин, И.Н. Топтыгин. «Сборник задач по электродинамике», М., Наука, 1970.

Вопросы для контроля

- 1) Уравнения Максвелла в дифференциальной и интегральной форме.
- 2) Граничные условия в макроскопической электродинамике. Поверхностные заряды и токи.
- 3) Уравнение непрерывности для электрического заряда.
- 4) Электрическая и магнитная поляризация среды.
- 5) Материальные уравнения для различных сред.
- 6) Принцип суперпозиции.
- 7) Теорема единственности решения уравнений Максвелла
- 8) Теорема Пойнтинга. Энергия электромагнитного поля. Поток энергии, вектор Пойнтинга.
- 9) Импульс электромагнитного поля, максвелловский тензор натяжений.
- 10) Уравнения электростатического поля. Скалярный потенциал. Уравнения Пуассона и Лапласа.
- 11) Особенности электростатического поля и потенциала вблизи точечных, линейных и поверхностных источников.
- 12) Разложение потенциала по электрическим мультиполям.
- 13) Функции Грина для задач Дирихле и Неймана.
- 14) Теорема взаимности в электростатике.
- 15) Собственная и взаимная энергия электростатических подсистем.
- 16) Энергия системы проводников
- 17) Понятие емкости в системе проводников.
- 18) Разделения переменных для уравнения Лапласа в декартовой и сферической системах координат.
- 19) Уравнения для постоянных токов в проводящей среде.
- 20) Уравнения, описывающие статические магнитные поля.
- 21) Векторный потенциал магнитостатического поля.
- 22) Поле произвольной системы замкнутых токов на больших расстояниях от нее. Магнитный дипольный момент.
- 23) Поля, создаваемые намагниченными телами. Скалярный потенциал магнитного поля.
- 24) Представление энергии в виде интеграла по области источников.
- 25) Теорема взаимности в магнитостатике.
- 26) Энергия системы квазилинейных токов.
- 27) Коэффициенты взаимной индукции и самоиндукции.

- 28) Магнитопроводы.
- 29) Скалярный и векторный потенциалы переменного электромагнитного поля. Калибровка Кулона. Калибровка Лоренца.
- 30) Уравнения для потенциалов электромагнитного поля.
- 31) Комплексная запись уравнений Максвелла.
- 32) Комплексная диэлектрическая проницаемость.
- 33) Теорема единственности решения уравнений Максвелла для гармонических полей.
- 34) Уравнения квазистатики. Скин-эффект.
- 35) Однородные и неоднородные плоские волны.
- 36) Волны в однородных анизотропных средах. Поляризация нормальных волн.
- 37) Описание прaksiального волнового пучка. Зоны геометрической оптики, Фраунгофера, Френеля.
- 38) Распространение импульсного сигнала в средах с временной дисперсией. Фазовая и групповая скорость.
- 39) Отражение волн от плоской границы раздела двух сред. Формулы Френеля, волновые импедансы. Граничные условия Леонтовича. Приближение геометрической оптики.
- 40) Волны в прямоугольном и круглом волноводах. Структура полей, критическая частота, вырождение. Телеграфные уравнения. Лемма Лоренца и теоремы взаимности.
- 41) Собственные и вынужденные колебания в полых резонаторах. Поля элементарного диполя, диаграмма направленности произвольного распределения тока.
- 42) Приближенные методы решения дифракционных задач: метод геометрической оптики, принцип Гюйгенса-Френеля, метод Кирхгофа. Поперечное сечение рассеяния.
- 43) Способы построения полей в линзовой и зеркальной линиях. Поля в открытых резонаторах.

Раздел 5 «Акустика океана»

1. Физические характеристики океана, влияющие на акустические поля.

- 1.1. Введение. Акустика океана как отрасль океанологии: прямые и обратные задачи.
- 1.2. Неоднородность океанической среды. Физические свойства морской воды.
- 1.3. Стратификация океана. Типичные вертикальные профили скорости звука и солёности. Формула Медвина. Различные способы измерения скорости звука в морской среде.
- 1.4. Затухание и рассеяние звука в море. Коэффициент затухания. Формулы Шулкина-Марша, Торпа, Киблуайта, Шихи-Холи.
- 1.5. Физические характеристики поверхности и дна океана, влияющие на распространение звука в морской среде.
- 1.6. Крупномасштабные неоднородности океана.

2. Лучевая теория распространения звука в океане.

- 2.1. Уравнение Гельмгольца. Плоские и сферические волны.
- 2.2. Рефракция лучей в слоистой среде: закон Снелля, радиус кривизны и кривизна луча. Трёхмерная рефракция.

2.3. Траектория луча в плоскослоистой среде. Кусочно-линейная аппроксимация скорости звука.

2.4. Интенсивность звука, фактор фокусировки, каустики.

2.5. Геометроакустическое приближение: уравнение переноса и уравнение эйконала. Приближение ВКБ для плоскослоистой среды.

3. Отражение звука от поверхности и дна океана.

3.1. Коэффициенты отражения и прозрачности на границе двух жидких сред.

3.2. Отражение плоской звуковой волны от жидкого слоистого дна.

3.3. Звуковое поле точечного источника, расположенного вблизи свободной поверхности.

3.4. Поле точечного источника, расположенного вблизи дна. Разложение сферической волны на плоские волны.

3.5. Боковая волна. Отражение от слоисто-неоднородного пространства. Каустики.

4. Распространение звука в условиях мелкого моря.

4.1. Лучевое представление поля точечного источника в однородном изоскоростном слое. Понятие "мнимых" источников.

4.2. Интегральное представление поля в слое.

4.3. Представление поля в слое в виде нормальных мод. Коэффициенты возбуждения. Затухающие и распространяющиеся моды. Концепция Бриллюэна.

4.4. Связь между различными представлениями поля в однородном волноводе.

4.5. Распространение звуковых волн в двуслойной жидкости (волновод Пекериса).

5. Распространение звука в подводном звуковом канале.

5.1. Модель глубокого моря. Канонический подводный звуковой канал.

5.2. Простейшая лучевая теория ПЗК. Коэффициент захвата энергии в ПЗК.

5.3. Выражение для поля точечного источника в ПЗК в виде суммы нормальных волн.

5.4. Интегральное представление поля в ПЗК.

6. Методы расчета звуковых полей в переменных по трассе акустических волноводах.

6.1. Метод поперечных сечений. Адиабатическое приближение. Примеры использования лучевого инварианта.

6.2. Метод Барриджа-Вайнберга - горизонтальные лучи и вертикальные моды. Звуковое поле в клиновидной области.

6.3. Метод параболического уравнения.

Литература:

1. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана. Л.: Гидрометеиздат, 1982. - 264 с.

2. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. – 343 с.

3. Клей К.С., Медвин Г. Акустическая океанография. М.: Мир, 1980. – 582 с.

4. Акустика океана / Под ред. Дж. Де Санто. М.: Мир, 1982.

5. Бреховских Л.М., Гончаров В.В. Введение в механику сплошных сред (в приложении к теории волн). М.: Наука, 1982. - 335 с.

6. Бархатов А.Н. Вопросы акустики ограниченных и неоднородных сред. Учебное пособие. Горький: изд-во ГГУ, 1980.
7. Толстой И., Клей К.С. Акустика океана. М.: Мир, 1969.
8. Бреховских Л.М., Годин О.А. Акустика слоистых сред. М.: Наука, 1989.
9. Урик Дж. Основы гидроакустики. Л.: Судостроение, 1978.
10. Распространение волн и подводная акустика / Под ред. Дж.Келлера и Дж.Пападакиса. М.: Мир, 1980. – 229 с.
11. Акустика в задачах. Учеб. рук-во. / Под ред. С.Н.Гурбатова и О.В.Руденко. М.: Наука, 1996. - 336 с.

Вопросы для контроля

- 1) Уравнение Гельмгольца. Плоские и сферические волны.
- 2) Рефракция лучей в слоистой среде: закон Снеля, радиус кривизны и кривизна луча.
- 3) Траектория луча в плоскослоистой среде.
- 4) Интенсивность звука, фактор фокусировки, каустики.
- 5) Геометроакустическое приближение: уравнение переноса и уравнение эйконала.
- 6) Приближение ВКБ для плоскослоистой среды.
- 7) Коэффициенты отражения и прозрачности на границе двух жидких сред.
- 8) Отражение плоской звуковой волны от жидкого слоистого дна.
- 9) Звуковое поле точечного источника, расположенного вблизи свободной поверхности.
- 10) Поле точечного источника, расположенного вблизи дна.
- 11) Боковая волна.
- 12) Отражение от слоисто-неоднородного пространства.
- 13) Лучевое представление поля точечного источника в однородном изоскоростном слое.
- 14) Интегральное представление поля в слое.
- 15) Представление поля в слое в виде нормальных мод. Коэффициенты возбуждения. Затухающие и распространяющиеся моды. Концепция Бриллюэна.
- 16) Связь между различными представлениями поля в однородном волноводе.
- 17) Распространение звуковых волн в двуслойной жидкости (волновод Пекериса).
- 18) Модель глубокого моря. Канонический подводный звуковой канал.
- 19) Простейшая лучевая теория ПЗК. Коэффициент захвата энергии в ПЗК.
- 20) Выражение для поля точечного источника в ПЗК в виде суммы нормальных волн.
- 21) Интегральное представление поля в ПЗК.
- 22) Метод поперечных сечений. Адиабатическое приближение. Примеры использования лучевого инварианта.
- 23) Метод Барриджа-Вайнберга - горизонтальные лучи и вертикальные моды.
- 24) Звуковое поле в клиновидной области.

25) Метод параболического уравнения.

Раздел 6 «Механика сплошных сред»

1. Общие закономерности движения сплошной среды.

Определение сплошной среды. Механика сплошной среды как феноменологическая теория сплошной среды. Кинематика сплошной среды. Эйлерово и лагранжево описание. Основные законы механики и термодинамики сплошной среды. Законы сохранения массы, импульса и момента импульса. 1-е и 2-е начала термодинамики для сплошной среды. Законы движения и теплообмена сплошной среды в дифференциальной и интегральной форме.

2. Газовая динамика (динамика идеального газа).

Определение идеальной жидкости и идеального газа. Идеальная жидкость или газ как двухпараметрические среды. Скорость звука. Основное термодинамическое соотношение для сплошной среды. Гидростатика. Закон Архимеда. Условия устойчивости плотностной стратификации в поле тяжести. Стационарное течение идеальной жидкости и идеального газа без источников тепла. Интеграл Бернулли. Одномерное стационарное течение жидкости или газа. Сверхзвуковые потоки. Элементарная теория сопла Лавалья. Потоки массы, импульса, энергии. Стационарное одномерное движение идеального газа с теплообменом. Тепловое сопло Лавалья. Поверхности разрыва. Граничные условия на поверхностях разрыва. Ударные волны. Теория ударной адиабаты. Простые волны в идеальном газе. Образование разрыва. Инварианты Римана и характеристики. Распространение одномерных возмущений в трубе, заполненной газом.

3. Гидродинамика идеальной несжимаемой жидкости.

Уравнение состояния несжимаемой жидкости. Условия применимости приближения несжимаемости. Уравнение Эйлера. Потенциальное течение идеальной несжимаемой жидкости. Потенциальное обтекание твердых тел. Парадокс Даламбера. Присоединенная масса. Подъемная сила. Плоское безвихревое течение несжимаемой жидкости. Комплексный потенциал. Применение метода конформных преобразований для расчета плоских потенциальных течений. Потенциальные волны на поверхности тяжелой жидкости. Гравитационные и капиллярные волны. Приближение мелкой воды. Простые волны на мелкой воде. Вихревое движение идеальной несжимаемой жидкости. Теорема о циркуляции. Свойство вмерзновенности вихревых линий. Внутренние гравитационные волны. Особенности анизотропной дисперсии.

4. Динамика вязкой несжимаемой жидкости.

Тензор напряжений в вязкой жидкости. Коэффициенты вязкости. Уравнение Навье-Стокса. Принцип подобия и число Рейнольдса. Движение вязкой жидкости при малых числах Рейнольдса. Обтекание сферы потоком вязкой жидкости при малом числе Рейнольдса. Формула Стокса. Движение вязкой жидкости при большом числе Рейнольдса. Гипотеза Прандтля о пограничном слое. Пограничный слой на плоской пластинке. Явление отрыва пограничного слоя Ламинарный след.

5. Гидродинамическая неустойчивость и переход к турбулентности.

Неустойчивость тангенциального разрыва. Неустойчивость плавного плоскопараллельного потока идеальной жидкости. Теорема Рэлея. Турбулентное течение. Мелкомасштабная структура турбулентности. Гипотезы Колмогорова о статистических свойствах мелкомасштабной турбулентности при больших числах Рейнольдса. Инерционный интервал. Закон $2/3$. Полуэмпирические теории турбулентности. Турбулентные напряжения и их градиентные аппроксимации. Турбулентный пограничный слой.

6. Динамика упругого деформируемого твердого тела.

Кинематика твердого тела. Тензор напряжений, его геометрический смысл. Уравнения движения и теплообмена упругого твердого тела. Основное термодинамическое соотношение для твердого тела. Свободная энергия. Закон Гука. Коэффициенты Лямэ. Статические деформации упругого твердого тела. Однородные деформации. Модуль Юнга и коэффициент Пуассона. Общее уравнение равновесия упругого твердого тела. Термоупругие деформации. Свободная энергия, обобщенный закон Гука. Общее уравнение равновесия неоднородно нагретого твердого тела. Изотермические и адиабатические деформации. Упругие волны в твердом теле. Продольные и поперечные волны. Отражение и преломление упругих волн. Поверхностная волна Рэлея.

Литература:

1. *Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц*, «Гидродинамика» (6 том курса "Теоретическая физика"), Наука, Глав.ред.физ.-мат.лит., М., 1986, 736 стр.
2. *Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц*, «Теория упругости» (7 том курса "Теоретическая физика"), Наука, Глав.ред.физ.-мат.лит., М., 1987, 247 стр.
3. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа. – М.: Физ.-мат.лит., 1973.
4. *Седов Л.И.* Механика сплошной среды Т1, Т.2, М.: Наука, 1994.
5. *Бреховских Л.М., Гончаров В.В.* Введение в механику сплошных сред. М., "Наука", 1982.
6. *Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В.* Теоретическая гидромеханика Т.1, Т.2, М.: Физматгиз, 1963.
7. *Бетчелор Дж.* Введение в динамику жидкости. Пер. с англ. – М., Мир, 1973. 758 с.
8. *Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П.* Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений.
9. *Монин А. С., Яглом А. М.*, Статистическая гидромеханика, ч. 1, М., 1965; ч. 2, М., 1967.
10. *Ле Блон П., Майсек Л. М.* Волны в океане. М.: Мир 1981. 682с.
11. *Тимошенко С.П.* Курс теории упругости. Киев, "Наукова думка", 1972, 502 с.

Вопросы для контроля

- 1) Закон сохранения массы в дифференциальной и интегральной форме. Поток массы.
- 2) Закон сохранения импульса в дифференциальной и интегральной форме. Поток импульса. Тензор поверхностных напряжений.
- 3) Закон сохранения энергии в дифференциальной и интегральной форме. Поток энергии.
- 4) Теорема Бернулли.

- 5) Скорость звука
- 6) Законы сохранения массы, импульса и энергии для стационарного одномерного потока идеального газа
- 7) Граничные условия на разрыве.
- 8) Ударная волна и простая волна (определения).
- 9) Условие несжимаемости жидкости.
- 10) Парадокс Даламбера
- 11) Потенциал и функция тока.
- 12) Дисперсионные уравнения для гравитационных волн на глубокой и мелкой воде
- 13) Теорема о циркуляции
- 14) Тензор напряжений в вязкой жидкости. Уравнение Навье-Стокса
- 15) Число Рейнольдса и его физический смысл.
- 16) Формула Стокса
- 17) Закон расширения ламинарного пограничного слоя на плоской пластинке.
- 18) Теорема Рэлея об устойчивости плоскопараллельного потока идеальной жидкости.
- 19) Гипотезы Колмогорова о статистических свойствах мелкомасштабной турбулентности при больших числах Рейнольдса. Инерционный интервал. Закон $2/3$.
- 20) Турбулентные напряжения и их градиентные аппроксимации.
- 21) Тензор деформаций
- 22) Закон Гука для изотропной упругой среды.
- 23) Общее уравнение движения упругого твердого тела и граничные условия
- 24) Уравнения для продольных и поперечных волн в изотропной упругой твердой среде.

Раздел 7 «Физика плазмы»

1. Общие сведения о плазме.

Квазинейтральность плазмы. Дебаевское экранирование. Ленгмюровские колебания. Классификация видов плазмы.

2. Столкновения в плазме.

Законы сохранения и характеристики столкновения. Задача рассеяния частицы в центральном поле. Дифференциальное и интегральное сечения рассеяния. Парные кулоновские столкновения. Формула Резерфорда. Кулоновский логарифм.

3. Кинетические уравнения для плазмы.

Уравнения с самосогласованным полем. Столкновительный член. Кинетическое уравнение Больцмана. Равновесные функции распределения. H-теоремы Больцмана. Столкновительный член в случае слабого рассеяния частиц. Уравнение Фоккера-Планка. Интеграл кулоновских столкновений в форме Ландау (без вывода). Модельные интегралы

столкновений. Вычисление коэффициентов электропроводности и теплопроводности плазмы на базе кинетического уравнения с модельным интегралом столкновений.

4. Гидродинамическое описание плазмы.

Метод моментов функции распределения и вывод уравнений для моментов. Уравнения двухжидкостной и одножидкостной гидродинамики. Бесстолкновительная квазигидродинамика плазмы.

5. Процессы переноса в плазме.

Коэффициенты подвижности, диффузии и термодиффузии. Соотношение Эйнштейна. Амбиполярная диффузия. Вывод уравнения амбиполярной диффузии.

6. Уравнения электромагнитного поля в среде с временной и пространственной дисперсией.

Тензор комплексной диэлектрической проницаемости и его свойства. Магнитная проницаемость изотропной среды с пространственной дисперсией. Энергия электромагнитного поля в среде. Плоские электромагнитные волны в среде. Дисперсионные уравнения для поперечных и продольных волн.

7. Волны в изотропной плазме.

Диэлектрическая проницаемость холодной плазмы. Плазменные колебания в одномерном потоке. Энергия волн и диэлектрическая проницаемость. Волны с отрицательной энергией. Плазменная волна в нагретой плазме. Ионнозвуковые колебания. Поперечные волны в холодной плазме. Показатель преломления и постоянная затухания.

8. Кинетическая теория плазменных волн.

Затухание Ландау. Правило обхода Ландау. Диэлектрическая проницаемость плазмы с максвелловской функцией распределения. Ленгмюровские колебания: дисперсионное соотношение и декремент бесстолкновительного затухания. Ионнозвуковые колебания.

9. Электромагнитные волны в неоднородной изотропной плазме.

ТЕМ волны в плоскостной среде. ВКБ приближение. Уравнения Эйри для ТЕМ волн в линейном слое. Распространение ТЕ волны (наклонное падение). Резонансное возбуждение плазменных колебаний при наклонном падении ТМ волны. Квазистатическая модель для расчета эффективности линейной трансформации ТМ волны в ленгмюровские колебания: случай столкновительной и бесстолкновительной трансформации.

10. Взаимодействие пучков заряженных частиц с плазмой.

Гидродинамическая и кинетическая пучковые неустойчивости ленгмюровских колебаний. Токовые неустойчивости в плазме: Бунемановская неустойчивость, кинетическая ионнозвуковая неустойчивость.

11. Квазилинейная теория.

Уравнения квазилинейной теории. Квазилинейная релаксация пучковой неустойчивости.

12. Волны в магнитоактивной плазме.

Тензор диэлектрической проницаемости плазмы в постоянном магнитном поле. Однородные плоские волны в магнитоактивной плазме. Продольное распространение. Поперечное распространение. Потенциальные продольные колебания. Вистлеры.

13. Магнитная гидродинамика.

Квазигидродинамика плазмы в магнитном поле. Уравнения магнитной и гидродинамики. Обобщенный закон Ома. Вмороженность магнитного поля. Равновесие плазмы в магнитном поле: Z пинч, тэта-пинч, бессилловые конфигурации. Линеаризация уравнений МГД. Альфвеновские и магнитозвуковые волны.

14. Процессы переноса в магнитном поле.

Проводимость плазмы в магнитном поле. Амбиполярная диффузия. Униполярный перенос.

15. Динамика плазмы в ВЧ полях.

Усредненная ВЧ сила. Кинетические уравнения и квазигидродинамика плазмы в ВЧ полях. Стационарные распределения бесстолкновительной плазмы и процессы установления. Омический нагрев плазмы в неоднородном поле. Релятивистская нелинейность. Самосогласованные уравнения нелинейной теории плазмы.

16. Самовоздействие плоских волн в плазме.

Стационарные ТЕМ волны. Самоподдерживающиеся волноводные каналы ТЕ волн. Солитоны огибающих в плазме; ленгмюровский солитон.

17. Нелинейное взаимодействие волн в плазме.

Трехволновые процессы. Распадные неустойчивости. Соотношения Мэнли-Роу. Модифицированный распад. Процессы индуцированного рассеяния волн. Рассеяние на электронах. Рассеяние на ионах.

18. Самофокусировка квазиоптических волновых пучков.

Нелинейное параболическое уравнение, уравнения квазиоптики. Однородные пучки. Законы сохранения. Нелинейная геометрическая оптика. Самофокусировочная неустойчивость плоской волны.

Литература:

1. *Лифшиц Е.М. Питаевский Л.П.* «Физическая кинетика». – М.: Наука, 2003.
2. *Александров А.Ф., Богданкевич Л.С., Рухадзе А.А.* «Основы электродинамики плазмы». – М.: Высшая школа, 1988.
3. *Кролл Н., Трайвелтис А.* «Основы физики плазмы». – М.: Мир, 1975.
4. *Гинзбург В.Л.* «Распространение электромагнитных волн в плазме». – М.: Наука, 1967.
5. *Силин В.П., Рухадзе А.А.* «Электромагнитные свойства плазмы и плазмopodobных сред». – М.: Атомиздат, 1961.
6. *Кадомцев Б.Б.* «Коллективные явления в плазме». – М.: Наука, 1988.
7. «Электродинамика плазмы», *под ред. Ахиезера А.И.* – М.: Наука, 1974.
8. *Голант В.Е., Жилинский А.П., Сахаров С.А.* «Основы физики плазмы». – М.: Атомиздат, 1977.
9. *Арцимович Л.А., Сагдеев Р.З.* «Физика плазмы для физиков». – М.: Атомиздат, 1979.
10. *Трубников Б.А.* «Теория плазмы». – М.: Энергоатомиздат, 1996.
11. *Кингсен А.С.* «Введение в нелинейную физику плазмы». – М.: Изд-во МФТИ, 1996.

12. Франк-Каменецкий Д.А. Лекции по физике плазмы. М.: Атомиздат, 1968.
13. Спитцер Л. «Физика полностью ионизированного газа». – М.:ИЛ, 1957.
14. Мак Даниель « Процессы столкновений в ионизованных газах». – М.: Мир, 1967.
15. Чен Ф. «Введение в физику плазмы». – М.: Мир, 1987.
16. Лукьянов С.Ю. «Горячая плазма и управляемый ядерный синтез». – М.: Наука, 1975.
17. Роза Р. «Магнитогидродинамические преобразования энергии». – М.: Мир, 1970.
18. Гуревич А.В., Шварцбург А.Б. «Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере». – М.: Наука, 1973.
19. Железняков В.В. «Излучение в астрофизической плазме». – М.: Янус – К, 1997.
20. Власов С.Н., Таланов В.И. «Самофокусировка волн». – Н.Новгород, ИПФ РАН, 1997.
21. Дюдерштадт Дж., Мозес Г. «Инерционный термоядерный синтез». – М.: Энергоатомиздат, 1984.

Вопросы для контроля

- 1) Квазинейтральность. Дебаевское экранирование электростатического поля в плазме.
- 2) Парные кулоновские столкновения. Транспортное сечение кулоновского рассеяния, кулоновский логарифм.
- 3) Уравнение Фоккера – Планка. Интеграл кулоновских столкновений.
- 4) Кинетические уравнения с самосогласованным полем.
- 5) Двухжидкостная и одножидкостная гидродинамика плазмы. Квазигидродинамика бесстолкновительной плазмы.
- 6) Подвижность, диффузия, термодиффузия. Соотношение Эйнштейна.
- 7) Амбиполярная диффузия.
- 8) Тензор комплексной диэлектрической проницаемости и его свойства.
- 9) Энергия электромагнитного поля в среде с дисперсией. Волны с отрицательной энергией.
- 10) Нормальные волны в среде с временной и пространственной дисперсией. Продольная и поперечная диэлектрические проницаемости.
- 11) Диэлектрическая проницаемость изотропной плазмы /гидродинамическое приближение/. Плазменные волны.
- 12) Затухание Ландау ленгмюровских колебаний.
- 13) Бесстолкновительное затухание ионнозвуковых колебаний.
- 14) Электромагнитные волны в неоднородной плоскостной среде. Приближение геометрической оптики.
- 15) Диссипация энергии ТМ волны в области плазменного резонанса неоднородной плазмы.
- 16) Гидродинамическая пучковая неустойчивость.
- 17) Кинетическая пучковая неустойчивость.
- 18) Ионнозвуковая неустойчивость плазмы с током.
- 19) Квазилинейная релаксация пучковой неустойчивости.

- 20) Тензор диэлектрической проницаемости магнитоактивной плазмы.
- 21) Однородные плоские волны в магнитоактивной плазме /продольное распространение/.
- 22) Однородные плоские волны в магнитоактивной плазме /продольное распространение/.
- 23) Вистлеры.
- 24) Магнитозвуковые колебания плазмы.
- 25) Альфвеновские волны.
- 26) Нормальные волны в плазме в бесконечно сильном поле.
- 27) Магнитная гидродинамика плазмы. Основные уравнения.
- 28) Вмороженность магнитного поля.
- 29) Процессы переноса частиц в плазме в магнитном поле. Амфиполярная диффузия.
- 30) Бессилловые конфигурации магнитной гидродинамики.
- 31) Равновесие плазмы в магнитном поле. Z-пинч.
- 32) Проводимость плазмы в магнитном поле.
- 33) Потенциальные продольные колебания замагниченной плазмы.
- 34) Усредненная сила в ВЧ полях.
- 35) Омический нагрев плазмы в неоднородном ВЧ поле и перераспределение плотности.
- 36) Стационарные распределения плазмы в ВЧ полях и процессы их установления.
- 37) Солитоны огибающих поперечных волн.
- 38) Ленгмюровский солитон.
- 39) Уравнения нелинейной квазиоптики. Законы сохранения.
- 40) Квазигидродинамика плазмы в ВЧ поле.
- 41) Релятивистская нелинейность плазмы.
- 42) Усредненная сила в поле двух плоских волн с разными частотами.
- 43) Самоподдерживающиеся волноводные каналы TE-типа.
- 44) Самофокусирующая неустойчивость плоской волны.
- 45) Трехволновые процессы, распадная неустойчивость.
- 46) Модифицированная распадная неустойчивость.

Раздел 8 «Физика лазеров»

1. Введение в физику лазеров.

Что такое лазер. Место лазеров в современном мире. Основные понятия. Переходы в атоме под действием электромагнитного излучения. Спонтанные и вынужденные переходы. Коэффициенты Эйнштейна.

2. Линия перехода. Уширение спектральных линий.

Однородное и неоднородное уширение спектральных линий. Механизмы уширения и форма спектральных линий.

3. Когерентное усиление излучения.

Сечение перехода. Инверсия заселенностей. Активная среда. Накачка. Усиление излучения. Эффект насыщения усиления и поглощения. Интенсивность насыщения. Коэффициент усиления непрерывного усилителя. Коэффициент усиления импульсного усилителя. Формула Франца-Нодвига. Многопроходные усилители.

4. Открытые резонаторы.

Понятие об открытом резонаторе. Сходство и различие интерферометра Фабри-Перо и лазерного резонатора. Основные положения теории Фокса и Ли. Условие устойчивости резонатора. Резонатор с плоскими зеркалами, конфокальный резонатор. Гауссов пучок в свободном пространстве и в резонаторе с вогнутыми зеркалами. Продольные моды резонатора. Поляризационные моды резонатора. Кольцевой резонатор и его особенности.

5. Стационарная генерация.

Условие самовозбуждения открытого резонатора. Порог генерации. Стационарная генерация. Оптимальный коэффициент отражения зеркала (резонатор Фабри-Перо и кольцевой резонатор).

6. Уравнения для разности населенностей и интенсивности в резонаторе.

Уравнение для разности населенностей для 3-х-уровневой и 4-х-уровневой модели. Выходная мощность непрерывного генератора. Уравнение для интенсивности поля в резонаторе. Время установления стационарного режима и релаксационная частота для 3х уровневой и 4х-уровневой модели. Свободная генерация.

7. Модуляция добротности.

Модуляция добротности: идея, уравнения, оптимальный коэффициент отражения выходного зеркала, длительность импульса. Методы реализации модуляции добротности: насыщающийся поглотитель, вращающееся зеркало, электрооптический модулятор, акустооптический модулятор, ОВФ-зеркало.

8. Синхронизация мод и ультракороткие лазерные импульсы.

Генерация на двух и более продольных модах. Синхронизация мод: идея, уравнения, параметры выходного излучения. Методы синхронизации мод: насыщающийся поглотитель, электрооптический модулятор, акустооптический модулятор, керровская линза. Ультракороткие лазерные импульсы: генерация, усиление, диагностика.

9. Селекция мод.

Селекция продольных, поперечных, поляризационных мод в резонаторе: принципы и методы экспериментальной реализации. Подавление двунаправленной генерации в кольцевом резонаторе. Взаимные и невзаимные оптические элементы.

10. Термооптика твердотельных лазеров.

Источники тепла в лазерах. Основные тепловые эффекты в лазерах: тепловая линза, деполяризация, механическое разрушение. Параметры качества среды с точки зрения минимизации тепловых эффектов. Критерии оценки качества пучка. Методы подавления и компенсации тепловых эффектов. Понятие об импульсно-периодическом режиме.

11. Типы лазеров.

Газовые лазеры (в том числе атомарные, ионные, молекулярные, химические, фотодиссоционные, эксимерные и т.д.). Твердотельные лазеры. Лазеры на красителях. Полупроводниковые лазеры. Лазеры на свободных электронах.

Литература:

1. *Войтович А.П., Севериков В.Н.* Лазеры с анизотропными резонаторами. // Минск: Наука и техника, 1988. 271с.
2. *Блистанов А.А.* Кристаллы квантовой и нелинейной оптики. // Москва: МИСИС, 2000. 431с.
3. *Ананьев Ю.А.* Оптические резонаторы и проблема расходимости лазерного излучения. М. Наука, 1979.
4. *Ханин Я.И.* Динамика квантовых генераторов.(Квантовая радиофизика. Т.2. - М. Сов. Радио, 1975, 496 стр.
5. *Карлов Н.В.* Лекции по квантовой электронике. - М., Наука, 1988, 336.
6. *Ярив А.* Квантовая электроника. - М., Сов. Радио, 1980, 488. стр.
7. *А. Мейтленд, М. Данн.* Введение в физику лазеров, Наука, М., 1978.
8. *Звелто О.* Физика лазеров. - М., Мир, 1984, 395 стр.
9. *С.А. Ахманов, В.А. Выслоух, А.С. Чиркин.* Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. - М. Наука, 1988..
10. *Ф. Качмарек.* Введение в физику лазеров. Москва, "Мир", 1981.
11. Справочник по лазерам, т.1, 2. Под ред. А.М.Прохорова. Москва, "Советское радио", 1978.
12. *Пахомов И.И., Рожков О.В., Рождествин В.Н.* Оптико-электронные квантовые приборы. - М., Радио и связь, 1982, 456 стр.
13. *Ищенко Е.Ф., Климов Ю.М.* Оптические квантовые генераторы. - М., Сов. Радио, 1968, 468 стр.
14. *Аззам Р., Башара Н.* Эллипсометрия и поляризованный свет. // Москва: Мир, 1981. 583с.
15. *Джерард А., Берч Дж.* Введение в матричную оптику М. Мир , 1978
16. *Л. Аллен, Д. Джонс.* Основы физики газовых лазеров, Наука, М., 1970.
17. *Е.Ф. Ищенко, Ю.М. Климов.* Оптические квантовые генераторы, Сов. радио, М., 1968.
18. *Т.Маршалл.* Лазеры на свободных электронах. Москва, "Мир", 1987.
19. *Тарасов Л.В.* Физика процессов в генераторах когерентного оптического излучения. - М., Радио и связь, 1981, 440 стр.

Вопросы для контроля

- 1) Отличие лазеров от других источников света. Ключевые параметры лазерного излучения.
- 2) Связь вероятностей спонтанных и вынужденных переходов.
- 3) Определение и примеры однородного и неоднородного уширений линии.
- 4) Влияние механизма уширения на эффект насыщения перехода.

- 5) Критерии насыщения усиления в непрерывном и импульсном режимах.
- 6) Формула Франца-Нодвига и особенности ее применения для многопроходных усилителей.
- 7) Поперечные моды открытого резонатора и моды свободного пространства: сходство и отличие.
- 8) Влияние номера поперечной моды на частотный спектр резонатора.
- 9) Определение и метод расчета поляризационных мод резонатора.
- 10) Особенности кольцевого резонатора.
- 11) Коэффициент усиления при стационарной генерации лазера.
- 12) Зависимость выходной мощности от коэффициента обратной связи в непрерывном режиме. Физический смысл уменьшения мощности при больших и малых коэффициентах обратной связи.
- 13) Преимущества трехуровневой и четырехуровневой моделей.
- 14) Динамика инверсии населенностей и интенсивности лазерного излучения при свободной генерации.
- 15) Ограничения энергии и длительности импульса задающего генератора, связанные со спонтанным излучением и свободной генерацией.
- 16) Минимальная длительность импульса, достижимая в режиме модуляции добротности.
- 17) Активная и пассивная синхронизация мод.
- 18) Неэквидистантность продольных мод резонатора как ограничение генерации ультракоротких лазерных импульсов.
- 19) Методы усиления фемтосекундных лазерных импульсов, основные схемы стретчера и компрессора.
- 20) Принципы и приборы для измерения длительности фемтосекундных лазерных импульсов.
- 21) Методы ограничения спектра генерации вплоть до одной продольной моды в импульсных лазерах.
- 22) Влияние метода модуляции добротности на эффективность селекции мод.
- 23) Фотоупругий эффект и его влияние на поляризацию излучения.
- 24) Понятие о деполяризованном излучении и степени деполяризации.
- 25) Основные принципы и методы подавления тепловых эффектов в лазерах.
- 26) Специфика тепловых эффектов в импульсных, импульсно-периодических и непрерывных лазерах.
- 27) Использование буферных газов в газовых лазерах для передачи возбуждения и ускоренной релаксации нижнего уровня.
- 28) Физический принцип создания инверсии в газодинамических лазерах.
- 29) Основные редкоземельные ионы, используемые в твердотельных лазерах. Сравнение неодима и иттербия.
- 30) Сравнение ламповой и диодной накачки.

Раздел 9 «Физическая оптика»

1. Введение в физическую оптику.

Оптический диапазон электромагнитных волн. Основные характеристики световых волн. Описание световых волн с помощью уравнений Максвелла.

2. Описание распространения световых волн в приближении геометрической оптики.

Приближение геометрической оптики при описании световых пучков: основные уравнения, область применимости приближения. Описание световых пучков с помощью лучей.

Световые лучи в однородных и неоднородных средах. Описание световых лучей в линзоподобной среде.

Принцип Ферма для световых волн. Закон сохранения потока световой энергии в свободном пространстве.

3. Квазиоптическое описание распространения световых пучков.

Квазиоптическое приближение в теории световых пучков: основные уравнения и область их применимости. Общее решение квазиоптического уравнения в линейной однородной среде без источников.

Области дифракции световых пучков. Дифракция света на щели.

Гауссов пучок. Комплексная кривизна и расходимость в однородной среде. Фокусировка гауссовых пучков.

Преобразование пучков при фокусировке. Тонкая линза как спектральный прибор.

4. Молекулярная оптика.

Механизм дисперсии световых волн.

Связь макроскопических и микроскопических параметров. Действующее поле.

Соотношение Лорентц-Лоренца. Теорема “гашения” световых волн на границе вакуум-диэлектрик.

5. Рассеяние световых волн в неоднородной среде.

Основные физические механизмы, приводящие к рассеянию света. Спектр рассеяния световых волн. Рассеяние Рэлея и рассеяние Ми.

Рассеяние световых волн на флуктуациях плотности: интенсивность и диаграмма направленности рассеяния.

Рассеяние Мандельштама-Бриллюэна и температурное рассеяние. Рассеяние “крыла Рэлея”.

Комбинационное рассеяние света.

6. Статистическая оптика и теория когерентности.

Статистическая оптика: понятие о случайных световых волнах, их источниках, распространении и описании.

Когерентность световых волн. Временная и пространственная когерентность. Интерферометр Майкельсона, опыт Юнга.

Когерентность излучения тепловых источников. Теорема Ван Циттерта -Цернике.

7. Распространение света в анизотропных средах.

Тензор диэлектрической проницаемости анизотропной среды. Виды анизотропных сред, группы анизотропных кристаллов.

Фазовая и лучевая скорости световых волн в анизотропной среде.

Формулы Френеля в анизотропной среде. Геометрические построения для определения скорости распространения световых волн и направления поляризации в одноосном кристалле (эллипсоид волновых нормалей и эллипсоид обратных волновых нормалей).

8. Физические причины и основные механизмы оптической нелинейности.

Природа нелинейно-оптических эффектов. Основные механизмы оптической нелинейности: Электронная, керровская (ориентационная), стрикционная, тепловая, фоторефрактивная нелинейности.

9. Основные приближения теории нелинейно-оптических взаимодействий световых волн.

Тензор нелинейно-оптической восприимчивости. Среда с “квадратичной” и “кубичной” нелинейностью.

Уравнения для связанных волн в нелинейной среде. Приближение медленно меняющихся амплитуд.

Условия синхронизма для нелинейных взаимодействий световых волн.

10. Удвоение частоты световых волн в нелинейной среде, генерация суммарной и разностной частот.

Удвоение частоты света в среде с “квадратичной” нелинейностью. Условия синхронизма. Первый и второй типы взаимодействия при удвоении частоты в кристаллах.

Генерация суммарной частоты в среде с “квадратичной” нелинейностью. Соотношения Мэнли-Роу. Генерация разностной частоты.

11. Параметрическая генерация в среде с квадратичной нелинейностью.

Параметрическое усиление и генерация в “квадратичной” среде. Одно- и двухрезонаторные параметрические генераторы света. Частотная перестройка параметрического генератора.

12. Вынужденное рассеяние световых волн.

Вынужденное рассеяние световых пучков. Основные механизмы вынужденного рассеяния (ВР). Пороговая мощность ВР, режим насыщения ВР.

Вынужденное рассеяние Мандельштама – Бриллюэна. Стационарное и нестационарное рассеяние. Вынужденное температурное рассеяние.

Вынужденное комбинационное рассеяние света. Параметрическая связь “стоксовой” и “антистоксовой” компонент при вынужденном комбинационном рассеянии.

13. Четырёхволновое взаимодействие и обращение волнового фронта световых пучков.

Четырёхволновое взаимодействие световых пучков в нелинейных средах. Вырожденное по частоте и невырожденное взаимодействие.

Обращение волнового фронта (ОВФ) при четырёхволновом взаимодействии и вынужденном рассеянии световых пучков. Условия существования ОВФ при вынужденном рассеянии Мандельштама-Бриллюэна. Использование эффекта ОВФ.

14. Самовоздействие световых пучков.

Самовоздействие световых пучков. Основные проявления самовоздействия в среде с “кубичной” нелинейностью (самомодуляция, самофокусировка или самодефокусировка).

Самофокусировка светового пучка. Критическая мощность. Безабберационное приближение при описании самофокусировки. Многофокусность.

Неустойчивость плоской волны в среде с “кубичной” нелинейностью. Связь неустойчивости и самофокусировки волн.

Литература:

1. *М. Борн, Э. Вольф.* “Основы оптики.” Перевод с англ./ Под ред. Г.П. Мотулевича, М.: Наука, Физматлит, 1973.
2. *А.Н. Матвеев.* “Оптика”, М.: “Высшая школа”, 1985.
3. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика: Учебное пособие. В 10 т. Т. 8. Электродинамика сплошных сред. 3-е изд., испр. М.: Наука, Гл. ред. Физ.-мат. лит., 1992.
4. *С.А. Ахманов, Ю.Е. Дьяков, А.С. Чиркин.* “Введение в статистическую радиофизику и оптику”, М.: Наука, 1981.
5. *Шен И.Р.* «Принципы нелинейной оптики»: Пер. с англ./ Под ред. С. А. Ахманова, 1989.
6. *Ярив А.* «Квантовая электроника»: Пер. с англ. / Под ред. Я. И. Ханина, 1980.
7. *Зельдович Б.Я., Пилипецкий Н.Ф., Шкунов В.В.* «Обращение волнового фронта» 1985.
8. “Тепловое самовоздействие лазерных пучков”, Методическое пособие к лабораторной работе, составители О.Л. Антипов, Е.Л. Бубис, Нижний Новгород, Институт прикладной физики РАН, 2000.
9. *В.И. Татарский, С.М. Рытов.* “Распространение волн в турбулентной атмосфере”, М.: Наука, Физматлит, 1967.
10. *С.М. Рытов.* “Введение в статистическую радиофизику”, М.: Наука, Физматлит, 1966.
11. *С.А. Ахманов, Р.В. Хохлова.* “Проблемы нелинейной оптики,” Москва, 1964.
12. *Бломберген Н.* “Нелинейная оптика”, Пер. с англ./под ред. С.А. Ахманова, Москва, 1966.
13. *Беспалов В.И., Пасманик Г.А.* “Нелинейная оптика и адаптивные лазерные системы” 1986.
14. *Г. Агарвал,* “Нелинейная волоконная оптика”, Пер. с англ. Под ред. П.В. Мамышева. М.: Мир. 1996.

Вопросы для контроля

- 1) Оптический диапазон световых волн (частота и длина волны, энергия кванта, отличительные особенности световых волн).
- 2) Описание световых пучков в приближении геометрической оптики. Уравнение эйконала.
- 3) Принцип Ферма в геометрической оптике.
- 4) Квазиоптическое уравнение для световых пучков.
- 5) Области дифракции световых пучков.
- 6) Гауссов пучок. Радиус пучка и радиус кривизны волнового фронта.
- 7) Фокусировка гауссовых пучков. Радиус и длина фокальной перетяжки.
- 8) Дисперсия фазовой скорости световых волн.
- 9) Основные физические механизмы, приводящие к рассеянию света.

- 10) Временная и пространственная когерентность световых пучков.
- 11) Особенности распространения световых волн в однородной анизотропной среде (на примере одноосного кристалла).
- 12) Основные механизмы оптической нелинейности сред: тепловая, стрикционная, ориентационная, электронная.
- 13) Тензор нелинейно-оптической восприимчивости. Классификация нелинейнооптических эффектов.
- 14) Условия волнового синхронизма в нелинейной оптике.
- 15) Уравнения связанных волн в среде с квадратичной нелинейностью.
- 16) Принципы нелинейно-оптического удвоения частоты световых волн.
- 17) Генерация суммарной и разностной частоты в нелинейно-оптической среде. Соотношения Мэнли-Роу.
- 18) Виды параметрических генераторов света. Их отличительные особенности.
- 19) Вынужденное рассеяние световых волн: стартовые условия и причины лавинного нарастания волны рассеяния.
- 20) Основные физические механизмы вынужденного рассеяния света.
- 21) Особенности вынужденного комбинационного рассеяния световых волн.
- 22) Четырёхволновое взаимодействие световых волн (условия синхронизма и возможные следствия).
- 23) Эффект обращения волнового фронта световых пучков в нелинейной среде (суть эффекта и основные возможности его реализации).
- 24) Виды самовоздействия световых пучков в нелинейной среде.
- 25) Самофокусировка световых пучков (условия возникновения и режимы протекания). Неустойчивость плоской волны в нелинейной среде и её связь с самофокусировкой (самодефокусировкой) световых пучков.

Программа принята на заседании Ученого совета ИПФ РАН,
протокол № 4 от 7.04. 2022 г.