

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова

Физический факультет

**Программа вступительного экзамена в аспирантуру  
по направлению подготовки 03.06.01 Физика и астрономия  
направленность (профиль)  
«Теоретическая физика»,  
«Радиофизика»,  
«Физика полупроводников»**

Ярославль 2018

## **РАЗДЕЛ 1. Теоретическая физика**

### **1. Аналитическая механика и классическая теория поля**

Принцип наименьшего действия в механике. Уравнение Лагранжа. Функция Гамильтона. Уравнение Гамильтона. Свободные одномерные колебания. Вынужденные колебания. Затухающие колебания. Малые колебания многомерных систем. Собственные частоты. Нормальные координаты. Электромагнитное поле в классической физике. Уравнения Максвелла в вакууме. Уравнение непрерывности. Заряд в электромагнитном поле. Мультипольные моменты системы зарядов. Энергия системы зарядов во внешнем магнитном поле. Потенциалы Лиенара-Вихерта. Излучение электромагнитных волн (дипольное и магнито-дипольное излучения). Торможение излучением. Электрическое поле в диэлектриках. Постоянное магнитное поле в материальных средах. Уравнения Максвелла в веществе.

### **2. Квантовая механика и статистическая физика**

Уравнение Шредингера. Вероятностная интерпретация волновой функции. Плотность потока. Линейный одномерный осциллятор. Движение в центрально-симметричном поле. Момент импульса в квантовой механике. Атом водорода. Стационарная теория возмущений в квантовой механике. Расщепление спектральных линий водородоподобного атома в постоянном магнитном поле. Эффект Зеемана. Нестационарная теория возмущений. Теория квантовых переходов. Спин, оператор спина. Собственные значения и собственные функции оператора спина электрона. Уравнение Паули. Волновые функции частиц с произвольным спином. Тождественность частиц. Принцип Паули. Связь спина со статистикой. Термодинамические потенциалы. Энтропия. Распределение Максвелла-Больцмана. Свободная энергия больцмановского идеального газа. Уравнение состояния. Распределение Бозе. Вырожденный Бозе-газ. Излучение абсолютно черного тела. Распределение Ферми. Вырожденный Ферми-газ.

### **3. Релятивистские уравнения и формализм квантовой теории поля**

Уравнение Клейна-Гордона-Фока для скалярной частицы. Включение внешнего поля. Калибровочная инвариантность. Релятивистское уравнение Дирака. Спиновые степени свободы. 4-вектор тока. Вероятностная интерпретация волновой функции. Билинейные ковариантные формы. Решение свободного уравнения Дирака в виде плоских волн. Спиновый, орбитальный и полный моменты количества движения. Сохранение спиральности. Уравнение Дирака во внешнем электромагнитном поле. Нерелятивистское приближение. Уравнение Паули. Спиновый магнитный момент. Тонкое расщепление водородоподобных уровней. Классические поля. Лагранжев формализм. Теорема Нетер. Законы сохранения в теории поля. Квантование вещественного и комплексного скалярных полей. Пропагаторы вещественного и комплексного скалярных полей. Квантование и пропагатор фермионного поля. Квантование и пропагатор поля фотона.

### **4. Стандартная модель взаимодействий частиц**

Спинорная квантовая электродинамика (КЭД). Представление взаимодействия и S-оператор в КЭД. Правила Фейнмана. Комптон-эффект. Лагранжиан квантовой хромодинамики (КХД) и инвариантность относительно цветовых преобразований. Основные уравнения КХД. Квантование кваркового и глюонного полей. Правила Фейнмана в КХД. Рассеяние кварка на антикварке и потенциальная энергия их взаимодействия в нерелятивистском пределе. Единая электрослабая теория Вайнберга-Салама-Глэшоу. Сектор векторных бозонов. Скалярный сектор теории. Возникновение масс промежуточных бозонов. Фермионный сектор. Механизм появления масс фермионов. Смешивание поколений. Основные каналы распадов W- и Z-бозонов. Фермионные распады хиггсовского бозона. Распад t-кварка.

## Литература

1. Ландау Л. Д. Теоретическая физика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Т. 1: Механика. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. — 224 с.
2. Ландау Л. Д. Теоретическая физика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Т. 2: Теория поля. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. — 536 с.
3. Ландау Л. Д. Теоретическая физика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Т. 3: Квантовая механика (нерелятивистская теория). — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. — 800 с.
4. Берестецкий В. Б. Теоретическая физика / В. Б. Берестецкий, Е. М. Лифшиц, Л. П. Питаевский. Т. 4: Квантовая электродинамика. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. — 720 с.
5. Ландау Л. Д. Теоретическая физика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Т. 5: Статистическая физика. Часть 1. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. — 620 с.
6. Ландау Л. Д. Теоретическая физика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Т. 8: Электродинамика сплошных сред. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2016. — 656 с.
7. Лифшиц Е. М. Теоретическая физика / Е. М. Лифшиц, Л. П. Питаевский. Т. 9: Статистическая физика. Часть 2. Теория конденсированного состояния. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. — 440 с.
8. Биленький С. М. Введение в диаграммы Фейнмана и физику электрослабого взаимодействия. / С. М. Биленький. — М.: Ленанд, 2014. — 328 с.
9. Окунь Л. Б. Лептоны и кварки. / Л. Б. Окунь. — М.: Едиториал УРСС, 2015. — 352 с.
10. Боголюбов Н. Н. Квантовые поля. / Н. Н. Боголюбов, Д. В. Ширков. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. — 400 с.
11. Боголюбов Н. Н. Введение в теорию квантованных полей. / Н. Н. Боголюбов, Д. В. Ширков. — М.: Наука, 1984. — 597 с.
12. Пескин М. Введение в квантовую теорию поля. / М. Пескин, Д. Шредер — Ижевск.: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. — 784 с.
13. Соколов А. А. Квантовая электродинамика / А. А. Соколов, И. М. Тернов, В. Ч. Жуковский, А. В. Борисов. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1983. — 312 с.
14. Соколов А. А. Калибровочные поля / А. А. Соколов, И. М. Тернов, В. Ч. Жуковский, А. В. Борисов. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. — 260 с.

## РАЗДЕЛ 2. Волновые процессы в жидкости и газе

Понятие сплошной среды. Микроскопические, статистические и макроскопические феноменологические методы описания свойств, взаимодействий и движений материальных сред. Области приложения механики жидкости, газа и плазмы.

Механические модели, теоретическая схематизация и постановка задач, экспериментальные методы исследований. Основные исторические этапы в развитии механики жидкости и газа. Системы отсчета и системы координат. Лагранжевы и эйлеровы координаты. Инерциальные и неинерциальные системы отсчета в ньютоновской механике.

Точки зрения Эйлера и Лагранжа при изучении движения сплошных сред.

Определения и свойства кинематических характеристик движения: перемещения, траектории, скорость, линии тока, критические точки, ускорение, тензор скоростей деформации и его инварианты, вектор вихря, потенциал скорости, циркуляция скорости, установившееся и неустановившееся движение среды. Кинематические свойства вихрей. Закон сохранения массы. Уравнение неразрывности в переменных Эйлера и Лагранжа. Условие несжимаемости. Многокомпонентные смеси. Потоки диффузии. Уравнения неразрывности в форме Эйлера для многокомпонентных смесей.

Массовые и поверхностные, внутренние и внешние силы. Законы сохранения количества движения и моментов количества движения для конечных масс сплошной среды. Дифференциальные уравнения движения и момента количества движения сплошной

среды. Работа внутренних поверхностных сил. Кинетическая энергия и уравнение живых сил для сплошной среды в интегральной и дифференциальной формах.

Понятие о параметрах состояния, пространстве состояний, процессах и циклах. Закон сохранения энергии, внутренняя энергия. Уравнение притока тепла. Вектор потока тепла. Дифференциальные уравнения энергии и притока тепла. Законы теплопроводности Фурье. Различные частные процессы: адиабатический, изотермический и др.

Диссипативная функция. Основные макроскопические механизмы диссипации. Модель идеальной жидкости. Уравнения Эйлера. Полные системы уравнений для идеальной, несжимаемой и сжимаемой жидкостей. Начальные и граничные условия. Интегралы Бернулли и Коши—Лагранжа. Явление кавитации.

Теорема Томсона и динамические теоремы о вихрях. Возникновение вихрей. Модель вязкой жидкости. Линейно-вязкая (ньютоновская) жидкость. Уравнения Навье-Стокса. Полные системы уравнений для вязкой несжимаемой и сжимаемой жидкостей. Начальные и граничные условия. Диссипация энергии в вязкой теплопроводной жидкости.

Условия на поверхностях сильного разрыва в материальных средах и в электромагнитном поле. Тангенциальные разрывы и ударные волны. Равновесие жидкости и газа в поле потенциальных массовых сил. Закон Архимеда. Равновесие и устойчивость плавающих тел и атмосферы.

Общая теория непрерывных потенциальных движений несжимаемой жидкости. Свойства гармонических функций. Многозначность потенциала в многосвязных областях. Кинематическая задача о произвольном движении твердого тела в неограниченном объеме идеальной несжимаемой жидкости. Энергия, количество движения и момент количества движения жидкости при движении в ней твердого тела. Движение сферы в идеальной жидкости.

Теория пограничного слоя. Турбулентность. Ламинарное движение несжимаемой вязкой жидкости. Течения Куэтта и Пуазейля. Течение вязкой жидкости в диффузоре. Диффузия вихря. Приближения Стокса и Озеена. Задача о движении сферы в вязкой жидкости в постановке Стокса.

Ламинарный пограничный слой. Явление отрыва пограничного слоя. Устойчивость пограничного слоя. Теплообмен с потоком на основе теории пограничного слоя. Свободная и вынужденная конвекция. Приближение Буссинеска. Линейная неустойчивость подогреваемого плоского слоя и порог возникновения конвекции. Понятие о странном аттракторе.

Запаздывающие потенциалы. Эффект Доплера. Конус Маха. Уравнения газовой динамики. Характеристики. Одномерные неустановившиеся движения газов с плоскими, цилиндрическими и сферическими волнами. Автомодельные движения и классы соответствующих задач. Задачи о поршне и о сильном взрыве в газе.

## Литература

1. Сретенский Л.Н. Теория волновых движений жидкости. М.: Наука, 1977
2. Ланда П.С. Нелинейные колебания и волны. М.: URSS, 2010. 552 с.
3. Мейз Дж. Теория и задачи механики сплошных сред. М.: URSS, 2007. 318 с
4. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. Ч. I, II. М.: Физматгиз, 1963.
5. Седов Л.И. Механика сплошной среды. Т. I, II. 5-е изд. М.: Наука, 1994.
6. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. 10-е изд. М.: Наука, 1987.
7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. 3-е изд. М.: Наука, 1986.
8. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. 5-е изд. М.: Наука, 1978.
9. Черный Г.Г. Газовая динамика. М.: Наука, 1988.
10. Слезкин Н.А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости. М.: Гос. изд-во физ.-тех. лит-ры, 1955.
11. Прандтль Л. Гидроаэромеханика. РХД, 2000.

12. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974.
13. Седов Л.И. Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики. 3-е изд. М.: Наука, 1980.
14. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1976.
15. Механика сплошных сред в задачах. Т. 1, 2 / Г.Я. Галин, А.Н. Голубятников, Я.А. Каменярж и др. М.: Московский лицей, 1996.
16. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная неустойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука, 1972.
17. Уизем Дж. Линейные и нелинейные волны. М.: Мир, 1977.

### **РАЗДЕЛ 3. Физика твердого тела**

#### **1. Основные закономерности строения кристаллов**

Пространственная решетка. Выбор элементарной ячейки. Симметрия кристаллов. Точечные и пространственные группы симметрии. Обратная решетка. Типичные кристаллические структуры. Классификация кристаллов по типам их связи: ионные, ковалентные, металлические, молекулярные, водородные. Сопоставление различных типов связей. Методы определения структуры кристаллов: рентгеноструктурный анализ, электронография, электронная микроскопия, нейтронография.

#### **2. Дефекты в кристаллах**

Классификация дефектов кристаллической решетки. Точечные дефекты. Образование и взаимодействие точечных дефектов. Отжиг точечных дефектов. Краевые и винтовые дислокации. Размножение и движение дислокаций. Взаимодействие дислокаций. Частичные дислокации. Понятие о дисклинациях. Двумерные и трехмерные дефекты.

#### **3. Твердые растворы и химические соединения металлов**

Фазовые диаграммы. Фазовые превращения. Правило фаз Гиббса. Твёрдые растворы. Примеры твердых растворов. Правило Вегарда. Интерметаллические соединения.

#### **4. Диффузия**

Математическое описание диффузии. Механизмы диффузии. Диффузия в твёрдых растворах замещения и внедрения. Движущая сила диффузионного переноса. Диффузия в поле напряжений. Электроперенос. Методы определения коэффициентов диффузии.

#### **5. Тепловые свойства твёрдых тел**

Особенности теплового движения в твёрдых телах. Гармоническое приближение. Теплоёмкость твёрдых тел, закон Дюлонга и Пти. Классическая теория теплоёмкости Эйнштейна. Фононы. Теория Дебая. Расчёт дебаевского спектра. Колебания в кристалле как в дискретной системе. Случай одномерной цепочки атомов. Колебания в кристаллах со сложным базисом. Оптические и акустические фононы. Фононные спектры в твердых телах. Характеристическая температура. Ангармонизм колебаний атомов в кристаллах и природа теплового расширения. Связь коэффициента теплового расширения с температурой плавления.

#### **6. Электроны в твёрдых телах**

Уравнение Шрёдингера. Одноэлектронное приближение. Теорема Блоха. Модель Кронига-Пенни. Зоны Бриллюэна. Квазиимпульс и скорость электрона в кристалле. Заполнение зон электронами: металлы, полупроводники, диэлектрики. Эффективная масса электрона. Тензор эффективной массы. Поверхность Ферми. Плотность состояний. Построение поверхности Ферми по методу Харрисона. Форма изоэнергетической поверхности вблизи экстремальных точек зоны Бриллюэна. Экспериментальные методы определения электронной структуры твёрдых тел.

#### **7. Кинетические явления в твердых телах**

Кинетическое уравнение Больцмана. Интеграл столкновений. Время релаксации. Расчет

кинетических эффектов для стандартной зоны. Плотность электрического тока и потока энергии. Электропроводность твердых тел. Концентрация и подвижность носителей тока в полупроводниках, влияние температуры. Температурная зависимость электросопротивления металлов. Правило Матиссена. Влияние дефектов и примесей на электропроводность металлов и полупроводников. Электропроводность тонких пленок. Классические и квантовые размерные эффекты в тонких пленках.

## **8. Магнитные свойства твердых тел**

Физическая классификация магнетиков. Диамагнетизм. Теория Ланжавена. Диамагнетизм сферически несимметричных систем. Диамагнетизм Ландау. Парамагнетизм. Учет пространственного квантования в классической теории парамагнетизма. Законы Кюри и Кюри-Вейса для парамагнетиков. Парамагнетизм электронов проводимости. Ферромагнетизм. Теория Вейса. Зависимость намагниченности от поля. Обменное взаимодействие. Ферромагнитные домены. Стенки Блоха и стенки Нееля. Намагничивание ферромагнетиков во внешнем магнитном поле. Антиферромагнетизм и ферримагнетизм. Магнитная структура антиферромагнетиков, особенности обменного взаимодействия. Свойства антиферромагнетиков в слабых и сильных магнитных полях. Кристаллическая и магнитная структура ферримагнетиков. Ферриты в сильных магнитных полях.

## **9. Свойства диэлектриков**

Классификация и виды поляризации диэлектриков. Выделение различных вкладов поляризации из частотной зависимости диэлектрической проницаемости. Поляризация неполярных диэлектриков. Поляризация ионных кристаллов. Поляризация дипольных диэлектриков. Поляризация сегнетоэлектриков и электретов.

## **Литература**

1. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М., Наука, 1978.
2. Харрисон У.А. Электронная структура и свойства твердых тел. М., 1983.
3. Уманский Я.С., Скаков Ю.А., Иванов А.Н., Расторгуев Л.Н. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия. М., Металлургия, 1982.
4. Шаскольская М.П. Кристаллография. М., Высшая школа, 1976.
5. Маделунг О. Теория твердого тела. М., 1980.
6. Хирт Дж. Лоте И. Теория дислокаций. М., Атомиздат, 1972.
7. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твердого тела. М., 2000.
8. Блэйкмор Дж. Физика твердого состояния. М., Металлургия. 1972.
9. Блатт Ф. Физика электронной проводимости в твердых телах. М., Мир, 1971.
10. Вонсовский С.В. Магнетизм. М., Мир, 1971. М., Наука, 1971.
11. Кринчик Г.С. Физика магнитных явлений. Изд. МГУ, 1976.
12. Бокштейн Б.С. Диффузия в металлах. М., Металлургия, 1978.
13. Русаков А.А. Рентгенография металлов. М., Атомиздат, 1977.
14. Чопра К.Л. Электрические явления в тонких пленках. М., Мир, 1972.

## **РАЗДЕЛ 4. Физика полупроводников и полупроводниковых приборов**

### **1. Основные закономерности строения полупроводников**

1. Полупроводники, металлы, диэлектрики. Химическая связь и атомная структура полупроводников. Электронная конфигурация внешних оболочек атомов и типы сил связи в твердых телах. Параметры важнейших полупроводников – элементов  $A^{IV}$ ,  $A^{VI}$  и соединений типов  $A^{III}B^V$ ,  $A^{II}B^{VI}$ ,  $A^{IV}B^{VI}$ . Симметрия кристаллов. Трансляционная симметрия кристаллов. Базис и кристаллическая структура. Элементарная ячейка. Примитивная ячейка. Ячейка Вигнера — Зейтца. Решетка Браве. Обозначения узлов, направлений и плоскостей в кристалле. Обратная решетка, ее свойства. Зона Бриллюэна.

### **2. Методы формирования и модификации полупроводников**

Методы выращивания объемных монокристаллов полупроводников. Метод Чохральского. Метод Бриджмена. Методы выращивания эпитаксиальных пленок (эпитаксия из жидкой и газовой фазы). Молекулярно-лучевая эпитаксия. Металлорганическая эпитаксия. Методы легирования полупроводников.

### **3. Основные физические параметры полупроводников**

Основные методы определения параметров полупроводников: ширины запрещенной зоны, подвижности и концентрации свободных носителей, времени жизни неосновных носителей. Основные приближения зонной теории. Волновая функция электрона в периодическом поле кристалла. Теорема Блоха. Зона Бриллюэна. Энергетические зоны. Уравнения движения электронов и дырок во внешних полях. Метод эффективной массы. Искривление энергетических зон в электрическом поле. Движение электронов и дырок в магнитном поле. Связь зонной структуры с оптическими свойствами полупроводника. Уровни энергии, создаваемые примесными центрами в полупроводниках. Доноры и акцепторы. Мелкие и глубокие уровни. Водородоподобные примесные центры.

### **4. Статистика носителей заряда в полупроводниках**

Равновесная статистика электронов и дырок в полупроводниках. Функция распределения электронов. Концентрация электронов и дырок в зонах, эффективная плотность состояний. Положение уровня Ферми и равновесная концентрация электронов и дырок в собственных и примесных (некомпенсированных и компенсированных) полупроводниках. Многозарядные примесные центры.

### **5. Кинетические и рекомбинационные свойства носителей заряда в полупроводниках**

Кинетические явления - проводимость, эффект Холла и термо-ЭДС. Дрейфовая скорость, дрейфовая и холловская подвижности, фактор Холла. Дрейфовый и диффузионный ток. Соотношение Эйнштейна. Механизмы рассеяния носителей заряда в неидеальной решетке. Взаимодействие носителей заряда с акустическими и оптическими фононами. Рассеяние носителей заряда на заряженных и нейтральных примесях. Рекомбинация электронов и дырок в полупроводниках. Генерация и рекомбинация неравновесных носителей заряда. Квазиравновесие, квазиуровни Ферми. Уравнение кинетики рекомбинации. Времена жизни. Фотопроводимость. Механизмы рекомбинации. Излучательная и безызлучательная рекомбинация. Межзонная рекомбинация. Рекомбинация через уровни примесей и дефектов. Центры прилипания. Оже-рекомбинация.

### **6. Явления на границе различных твердых тел**

Схема энергетических зон в контакте металл-полупроводник. Обогащенные, обедненные и инверсионные слои пространственного заряда вблизи контакта. Вольт-амперная характеристика барьера Шоттки. Энергетическая диаграмма  $p-n$  перехода. Инжекция неосновных носителей заряда в  $p-n$  переходе. Гетеропереходы. Энергетические диаграммы гетеропереходов. Оптические явления в полупроводниках. Межзонные переходы. Край собственного поглощения в случае прямых и непрямых, разрешенных и запрещенных переходов. Фотоэлектрические явления. Примесная и собственная фотопроводимость. Влияние прилипания неравновесных носителей заряда на фотопроводимость.

### **7. Оптические явления в полупроводниках**

Оптические явления в полупроводниках. Комплексная диэлектрическая проницаемость, показатель преломления, коэффициент отражения, коэффициент поглощения. Связь между ними и соотношения Крамерса—Кронига. Межзонные переходы. Край собственного поглощения в случае прямых и непрямых, разрешенных и запрещенных

переходов. Экситонное поглощение и излучение. Спонтанное и вынужденное излучение. Поглощение света на свободных носителях заряда. Поглощение света на колебаниях решетки. Рассеяние света колебаниями решетки, комбинационное рассеяние на оптических фононах (Рамана - Ландсберга), рассеяние на акустических фононах (Бриллюэна -Мандельштама).

## **8. Физические явления в неупорядоченных системах и в структурах с пониженной размерностью** Аморфные и стеклообразные полупроводники. Структура атомной матрицы

некристаллических полупроводников. Гидрированные аморфные полупроводники. Особенности электронного энергетического спектра неупорядоченных полупроводников. Плотность состояний. Локализация электронных состояний. Щель подвижности. Механизмы переноса носителей заряда. Прыжковая проводимость. Закон Мотта. Полупроводниковые структуры пониженной размерности. Сверхрешетки. Размерное квантование. Квантовый эффект Холла.

## **9. Приборы на квантовых эффектах**

Туннельный диод. Биполярный транзистор. Тиристор. Энергетическая диаграмма структуры металл-диэлектрик-полупроводник (МДП). Полевые транзисторы на МДП-структурах. Приборы с зарядовой связью. Фотоэлементы и фотодиоды. Спектральная чувствительность. Полупроводниковые детекторы ядерных излучений. Фотоэлектрические преобразователи, КПД преобразования. Светодиоды и полупроводниковые лазеры. Инжекционные лазеры на основе двойной гетероструктуры. Использование наноструктур в полупроводниковых приборах.

## **Литература**

1. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. М.: Наука, 1979.
2. Киреев П.С. Физика полупроводников. М.: Высшая школа, 1975.
3. Шалимова К.В. Физика полупроводников. М.: Энергоатомиздат, 1985.
4. Смит Р. Полупроводники. М.: Мир, 1982.
5. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. В 2-х книгах. М.: Мир, 1984.
6. Гаман В.И. Физика полупроводниковых приборов. Томск: НТЛ, 2000.
7. Милнс А., Фойхт Д. Гетеропереходы и переходы «металл-полупроводник», М.: Мир, 1975.
8. Борисенко В.Е., Воробьева А.И., Уткина Е.А. Нанoeлектроника. М.: Бином, 2009.
9. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников. - М.: ГРФМЛ. Наука. 1978. 615 с.
10. Кравченко А.Ф., Овсяк В.Н. Электронные процессы в твердотельных системах пониженной размерности. - Новосибирск. 2000. 448 с.
11. Зеегер К. Физика полупроводников. М.: Мир. 1977. 615 с.

## **РАЗДЕЛ 5. Получение, распространение и использование электромагнитных волн**

### **1. Генерирование и преобразование колебаний**

Уравнения колебательных систем. Уравнения систем с малым параметром. Гамильтоновы системы. Нелинейная консервативная система с одной степенью свободы. Исследование фазового портрета. Зависимость частоты колебания от амплитуды. Нелинейная диссипативная система с постоянным трением. Исследование фазового портрета. Резонанс в системе с нелинейной восстанавливающей силой. Уравнение Дуффинга. Устойчивость периодических режимов. Теория скачка. Внешнее периодическое воздействие на автогенератор. Синхронизация генератора. Исследование бифуркационной кривой.

### **2. Преобразование случайных процессов**

Преобразование случайных процессов в линейных системах. Характеристики процессов в переходном и установившемся режимах. Преобразование случайных процессов в нелинейных системах. Характеристики процессов в переходном и установившемся режимах. Марковские процессы. Оптимальная фильтрация по критерию максимума отношения сигнал/шум. Согласованный фильтр. Оптимальная фильтрация и экстраполяция по критерию минимума среднего квадрата ошибки. Фильтр Винера. Фильтр Калмана. Нелинейная оптимальная фильтрация. Расширенный фильтр Калмана. Процессы в колебательном контуре при случайном воздействии. Процессы в автогенераторе при случайном воздействии.

### **3. Распространение электромагнитных волн**

Электромагнитные волны в различных средах. Поток энергии. Поляризация электромагнитных волн. Распространение электромагнитных волн в диспергирующих средах. Простейшие физические модели диспергирующих сред. Волновой пакет в первом и втором приближении теории дисперсии. Фазовая и групповая скорости. Параболическое уравнение для огибающей. Свойства электромагнитных волн в анизотропных средах. Оптические кристаллы, уравнение Френеля, обыкновенная и необыкновенная волны. Магнитоактивные среды. Тензор диэлектрической проницаемости плазмы. Тензор магнитной проницаемости феррита. Особенности электромагнитных волн в магнитоактивных средах. Дифракция электромагнитных волн. Методы решения дифракционных задач. Метод Гюйгенса-Кирхгофа. Волновой параметр. Дифракция Френеля и Фраунгофера. Электромагнитные волны в направляющих системах. Типы волн. Общие свойства и параметры волн. Электромагнитное поле в волноводах.

### **Литература**

1. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. -2-е изд., перераб. и доп. - М.: Радио и связь. -1982. -624 с.
2. Тихонов В.И., Миронов М.А. Марковские процессы.- М.: Сов. радио, 1977.-488 с.
3. Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. М.: Связь. 2004.-608 с.
4. Тихонов В.И., Шахтарин Б.И., Сизых В.В. Случайные процессы: Примеры и задачи. Т1: Случайные величины и процессы: Учеб. пособие для вузов.- М.: Радио и связь, 2003. - 399с.
5. Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний. М.: Наука, 1981. 561 с.
6. Капранов М.В., Кулешов В.Н., Уткин Г.М. Теория колебаний в радиотехнике. М.: Наука, 1984. 320 с.
7. Горяченко В.Д. Элементы теории колебаний: Учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 2001. 395 с.
8. Яковлев О.И., Якубов В.П., Урядов В.П., Павельев А.Г. Распространение радиоволн. М.: Ленанд, 2009. 496 с.
9. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. М.: Наука, 1990.
10. Пименов Ю. В. Линейная макроскопическая электродинамика. Вводный курс для радиофизиков и инженеров. М.: Интеллект, 2008.

Программа утверждена на заседании Совета физического факультета (протокол №7 от 21 марта 2017 года).