

УТВЕРЖДАЮ

Председатель приемной комиссии

\_\_\_\_\_ С.В. Бачевский

\_\_\_\_\_.\_\_\_\_\_.2020 г.

## ПРОГРАММА

вступительного экзамена в аспирантуру  
по математическим и естественным наукам  
по направлению **03.06.01 «Физика и астрономия»**,  
профиль 01.04.04 – «Физическая электроника»

### 1. Волновые процессы

#### 1.1. Основы теории колебаний

Линейные колебательные системы. Колебательные системы различной природы. Временной и спектральный подходы в теории колебаний. Силовое и параметрическое воздействие на колебательные системы.

Автоколебательная система с одной степенью свободы. Энергетические соотношения в автоколебательных системах. Методы расчета автоколебательных систем.

Воздействие гармонического сигнала на автоколебательные системы. Синхронизация.

Колебательные системы с двумя и многими степенями свободы. Нормальные колебания. Вынужденные колебания. Взаимная синхронизация колебаний двух генераторов.

Параметрическое усиление и параметрическая генерация. Параметрические усилители и генераторы. Деление частоты. Умножение частоты.

Собственные и вынужденные колебания линейных распределенных систем. Собственные функции системы (моды). Разложение вынужденных колебаний по системе собственных функций.

Распределенные автоколебательные системы. Условия самовозбуждения.

Одномодовый и многомодовый режимы автогенерации.

Оптические резонаторы. Резонатор Фабри-Перо, конфокальный и концентрический резонаторы. Неустойчивый резонатор. Продольные и поперечные типы колебаний. Спектр частот и расходимость излучения. Добротность.

Хаотические колебания в динамических системах. Понятие о хаотическом (странном) аттракторе. Возможные пути потери устойчивости регулярных колебаний и перехода к динамическому хаосу.

## 1.2. Основы электродинамики

Теорема Гаусса и теорема Стокса и их применение к вычислению электрических магнитных полей простейших источников. Ток смещения. Система уравнений Максвелла (в интегральной и дифференциальной формах). Условия на границе раздела двух сред.

Электродинамические и квазистатические потенциалы. Лоренцовская и кулоновская калибровки. Теорема Гельмгольца. Выражения для напряженности электрического и индук-

1

ции магнитного полей через скалярный и векторный потенциалы. Калибровочная инвариантность. Уравнение непрерывности (закон сохранения заряда) в дифференциальной и интегральной формах.

Волновое уравнение для электромагнитного поля в вакууме. Плоские монохроматические волны и их свойства. Частота, волновой вектор и поляризация электромагнитных волн. Элементы квантовой теории света. Фотоны. Распространения света в веществе: дисперсия, фазовая и групповая скорости, комплексный показатель преломления.

Дифракция электромагнитных волн (приближения Гюйгенса-Френеля и Фраунгофера). Отражение и преломление плоских электромагнитных волн на плоской границе раздела двух изотропных сред. Приближенные граничные условия Леонтовича. Скин-эффект.

Распространение волновых пучков (параболическое уравнение, волновой параметр, гауссовы пучки). Векторы Герца. Поле электрического диполя в свободном пространстве. Дальняя и ближняя зоны. Переходные процессы.

Вихревые и потенциальные поля. Быстрые и медленные волновые процессы в

«активных» средах. Квазистатическое приближение в уравнениях Максвелла.

Энергетические соотношения электродинамики. Уравнение баланса мощностей электромагнитного поля. Поток энергии. Вектор Умова-Пойнтинга. Запасенная энергия и мощность, переносимая волной. Групповая скорость и скорость переноса энергии. Понятие о волнах с положительной и отрицательной энергией.

Ортогональность и нормировка собственных волн волноведущей структуры в отсутствие диссипации и пространственной дисперсии. Разложение полей в ряд по собственным волнам. Постановка задачи о возбуждении собственных волн сторонними источниками.

Плоские однородные и неоднородные волны. Макроскопические уравнения Максвелла в среде. Диэлектрическая и магнитная восприимчивости, удельная проводимость. Диэлектрическая и магнитная проницаемости. Материальные уравнения. Электромагнитные волны в диэлектрической среде и в среде с конечной проводимостью. Тангенс угла диэлектрических потерь.

Распространение волн в диспергирующей среде. Простейшие физические модели диспергирующих сред. Фазовая и групповая скорости. Параболическое уравнение для огибающей. Понятие о временной (частотной) и пространственной дисперсий активных сред. Нелокальные эффекты в активных средах и дополнительные граничные условия. Дисперсионные соотношения Крамерса-Кронига и принцип причинности. Комплексный показатель преломления. Оптические характеристики среды.

Свойства электромагнитных волн в анизотропных средах. Пассивные и активные среды. Нелинейные диэлектрики: ферриты, сегнетоэлектрики. Материальные уравнения для поляризованных и намагниченных сред. Тензоры диэлектрической и магнитной проницаемости.

Электромагнитные волны в длинных линиях. Телеграфные уравнения. ТЕМ-волны. Волны в периодических структурах. Полосы пропускания и непрозрачности. Резонаторы. Добротность резонатора.

Электромагнитные волны в регулярных закрытых волноводах. Особенности дисперсии электромагнитных волн. Характер распределения полей для распространяющихся (волноводных) и нераспространяющихся (реактивных) мод. Полнота системы собственных функций. Перенос мощности электромагнитными волнами в регулярном волноводе. Волноводные резонаторы. Добротность резонатора.

Общая теория регулярных волноводов и резонаторов. Цилиндрические волны. Волны поперечно-электрического (ТЕ) и поперечно-магнитного (ТМ) типа в регулярных волноводах. Граничные частоты. Фазовая и групповая скорости в волноводе. Прямоугольный и круглый волноводы. Граничные частоты и конфигурация поля для Е и Н-типов, токи на стенках. Вырождение волн. Концепция Бриллюэна. Свободные колебания прямоугольного резонатора.

Медленные волны. Замедление диэлектрической пластиной. Гребенчатые замедляющие системы. Волновод с диэлектрическим заполнением. Металлический волновод с гофрированной поверхностью. Симметричная волна в спиральном волноводе.

Электромагнитные волны в открытых диэлектрических волноводах. Понятие о дискретном (волноводном) и непрерывном (излучательном) спектре открытых волноводящих структур. Особенности дисперсии волноводных мод. Характер распределения полей для волноводных и излучательных мод. Использование диэлектрических волноводов на СВЧ и в устройствах интегральной оптики.

Взаимодействия плоских волн в нелинейных диспергирующих средах. Понятие о солитонах огибающей. Типы и свойства солитонов огибающей. Собственная и вынужденная модуляционная неустойчивость волн.

### **1.3. Принципы усиления, генерации и управления сигналами**

Усилители СВЧ-диапазона. Полоса пропускания усилителя.

Волновод с диэлектрическим заполнением.

Генерация волн в СВЧ-диапазоне. Принцип работы и устройство лампы бегущей и обратной волны. Генераторы СВЧ на полевых транзисторах, туннельных диодах, и лавинопролетных диодах.

Волны в плазме полупроводников с дрейфующими носителями заряда. Отрицательная дифференциальная проводимость (ОДП) в двухдолинных полупроводниках. Междолинный перенос электронов и эффект Ганна. Стабилизация полупроводникового образца с ОДП.

Электромагнитные волны в безграничной немагнитной плазме полупроводников. Тензор дифференциальной проводимости. Влияние дрейфа, диффузии и разогрева электронов на распространение волн. Волны пространственного заряда (ВПЗ) в тонкопленочных полупроводниковых структурах с продольным дрейфом. Конвективная неустойчивость (усиление) ВПЗ в условиях ОДП. Электромагнитные волны в активных линиях передачи СВЧ с поперечным дрейфом. Влияние магнитного поля на распространение волн в полупроводниковой плазме. Геликонные волны. Принципы

использования волновых процессов в полупроводниках в устройствах функциональной электроники СВЧ. Взаимодействие волн пространственного заряда с акустическим полем, акустоэлектрический эффект. Принципы работы акустоэлектронных устройств (усилители ультразвука, линии задержки, фильтры, конвольверы, запоминающие устройства).

#### **1.4. Процессы излучения в электродинамике. Антенны**

Излучение заряда, движущегося с ускорением. Потенциалы точечного заряда, движущегося в вакууме по произвольной траектории (потенциалы Лиенара-Вихерта). Электрическое и магнитное поля заряда, их основные физические особенности.

Особенности излучения при нерелятивистской скорости движения частицы; формула Лармора. Особенности излучения при релятивистской скорости движения частицы. Тормозное излучение. Синхротронное излучение.

Рассеяние плоской электромагнитной волны отдельным свободным зарядом. Эффективное дифференциальное сечения рассеяния. Полное сечение рассеяния (формула Томсона). Рассеяние плоской волны системой свободных частиц. Когерентное и некогерентное рассеяние.

Излучение Вавилова-Черенкова. Векторный и скалярный потенциалы заряженной точечной частицы, равномерно движущейся в недиспергирующей непоглощающей среде. Излучение Вавилова-Черенкова в частотно диспергирующей среде.

Переходное излучение. Понятие переходного излучения. Излучение заряда при пересечении границы идеального проводника.

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

#### **1.5. Движение заряженных частиц в электрическом и магнитном полях**

Сила, действующая на заряд, движущийся в магнитном поле. Сила Лоренца. Закон Ампера. Правило левой руки. Движение заряженных частиц в однородном магнитном поле. Удельный заряд. Отклонение заряженных частиц электрическим и магнитным полями. Обобщенная формула Лоренца. Масс-спектрометрия. Эффект Холла.

Ускорители заряженных частиц. Линейные, циклические и индукционные ускорители. Основные типы ускорителей: линейные электростатические (генератор Ван-де-Графа); линейные резонансные; резонансные циклические (циклотрон); бетатрон; фазотрон; синхрофазотрон. Принцип автофазировки. Метод встречных пучков. Методы охлаждения пучков.

Коллективные методы ускорения пучков заряженных частиц. Кильватерное ускорение в плазме и в структурах с заполнением.

## **2. Основы акустики**

### **2.1. Основные уравнения акустических полей в газах, жидкостях и твердых телах**

4

Основные характеристики акустических полей в газах и жидкостях. Система уравнений гидродинамики идеальных жидкостей. Линеаризация уравнений гидродинамики в задачах линейной акустики. Волновое давление. Скорость звука. Основные типы волн. Волны в поглощающих средах. Энергетические характеристики звуковых полей. Уравнения движения твердой упругой среды. Скалярный и векторный потенциалы. Продольные и поперечные волны.

### **2.2. Основы теории излучения и распространения акустических волн**

Основные характеристики излучающих систем. Сопротивление излучения. Характеристики направленности, коэффициент концентрации. Сферический излучатель. Общее решение для сопротивления излучения. Частные случаи. Цилиндрический излучатель. Общее решение для сопротивления излучения. Частные случаи. Круглая поршневая диафрагма в экране. Общее решение для сопротивления излучения. Анализ поля в дальней зоне, на оси излучателя. Характеристики излучения системы дискретных точечных излучателей, расположенных вдоль отрезка прямой. Излучение отрезка прямой. Компенсированная излучающая антенна. Взаимное сопротивление излучения системы излучателей.

### **2.3. Распространение акустических волн при наличии плоских границ раздела сред**

Отражение и преломление плоских волн на плоской границе раздела жидких и твердых сред. Постановка задачи. Граничные условия. Явление полного

внутреннего отражения. Прохождение и отражение плоских волн при взаимодействии с пластиной. Поверхностные волны (Волны Рэлея). Методы возбуждения. Нормальные волны в пластинах. Способы возбуждения.

#### **2.4. Распространение звука в трубах и рупорах**

Распространение звука в круглой трубе произвольного размера. Общее решение, анализ. Возбуждение звука в трубе. Резонанс для труб конечной длины. Распространение звука в трубе прямоугольного поперечного сечения. Рупорные антенны. Анализ решения для экспоненциального, катеноидального, конического рупора. Входное сопротивление рупора. Направленность рупора. Акустические элементы рупоров. Резонатор Гельмгольца. Акустические трансформаторы. Звукопроводы, акустические фильтры.

#### **2.5. Колебания стержней**

Продольные колебания стержней, уравнение колебаний, условие резонанса, способы возбуждения. Крутильные колебания стержней, уравнения колебаний, условие резонанса, способы возбуждения. Изгибные колебания. Базовая теория, поправки Рэлея и Тимошенко, условия резонанса. Колебания стержней переменного сечения. Концентраторы.

#### **2.6. Колебания мембран и пластин**

Уравнения колебаний мембран. Круглая и прямоугольная мембраны. Колебания пластин. Круглая и прямоугольная пластины. Толщинные и радиальные колебания пластин. Изгибные колебания тонких пластин. Уравнения колебаний. Решение и анализ решения задачи о колебаниях пластин, заземленных по контуру.

#### **2.7. Дифракция звуковых волн**

Основы дифракционных явлений. Постановка и методы решения дифракционных задач. Метод разделения переменных. Дифракция на жесткой и гибкой сферах. Анализ решений. Интегральная формула Кирхгофа. Приближенное решение дифракционных задач с помощью формулы Кирхгофа.

#### **2.8. Основы общей теории электроакустических преобразователей**

Преобразователи электрической, электромагнитной, электростатических систем; принцип действия. Уравнения преобразователя. Основные соотношения в режимах двигателя и генератора. Анализ решения.

Преобразователи пьезоэлектрической системы. Пьезоэффект. Уравнение пьезоэффекта. Типы пьезокристаллов. Пьезокерамика. Пластинчатый преобразователь. Стержневой преобразователь. Сферический преобразователь. Основные соотношения для характеристик.

Преобразователи магнитострикционной системы. Явление магнитострикции. Уравнения пьезомагнетизма.

Электрокинетические, пьезорезистивные и другие типы преобразователей.

Преобразователи с одной механической стороной. Преобразователь как четырехполюсник. Уравнение преобразователя. Схемы аналоги. Преобразователь с двумя механическими сторонами. Преобразователь как шестиполюсник. Уравнение преобразователя. Схемы аналоги.

Приемники звука. Чувствительность и направленные свойства приемников при работе на частотах резонанса и ниже резонанса.

## **2.9. Акустоэлектроника и акустооптика**

Возбуждение и прием поверхностных волн. Встречно-штыревые преобразователи. Линии задержки и фильтры на основе поверхностных волн в кристаллах.

Дифракция света на ультразвуке. Дифракция Рамана-Ната. Дифракция Брэгга. Акустооптика жидких кристаллов. Рассеяние Мандельштама-Бриллюэна.

## **2.10. Основы нелинейной акустики**

Плоские, сферические и цилиндрические нелинейные волны. Взаимодействие нелинейных волн. Параметрические антенны. Нелинейные акустические эффекты в кристаллах.

## **3. Квантовые магнитные явления. Магнитный резонанс**

Магнитные дипольные моменты ядра и электрона, электрический квадрупольный момент ядра. Спиновые системы. Вектор макроскопической намагниченности. Поведение вектора макроскопической намагниченности в постоянном магнитном поле. Воздействие переменного магнитного поля на спиновую систему.



Уравнение Блоха. Уравнение Блоха во вращающейся системе координат. Динамическая магнитная восприимчивость и ее компоненты. Анализ стационарного решения уравнения Блоха (форма, интенсивность и ширина спектральной линии). Эффективное магнитное поле, действующее по вращающейся системе координат.

Действие радиоимпульса на вектор макроскопической намагниченности.

Ядерный магнитный резонанс (ЯМР). Уровни энергии. Частоты переходов. Интенсивность сигналов ЯМР.

Ядерная магнитная релаксация. Основные представления о релаксационных процессах. Вероятность релаксационных переходов и скорость релаксации в ядерном магнитном резонансе. ЯМР-релаксация при наличии быстрого движения.

Механизмы ядерной магнитной релаксации.

ЯМР в жидкостях. Специфика сигналов ЯМР в жидкостях. Интенсивность, ширина и форма линии, времена релаксации. Экранирование ядер электронной оболочкой. Учет косвенных спин-спиновых взаимодействий.

Ядерный магнитный резонанс в твердых телах. Спектры ЯМР с учетом прямых магнитных диполь-дипольных взаимодействий. Второй момент линии в кристаллах с жесткой решеткой и его изменения при наличии подвижности отдельных ядер или групп ядер.

Квадрупольные взаимодействия и их влияние на спектры ЯМР поли- и монокристаллов. Методики определения тензора градиентов электрического поля по спектрам ЯМР.

ЯМР высокого разрешения в твердых телах. Вращение под магическим углом. Примеры импульсных последовательностей.

Основные особенности ЯМР в магнитоупорядоченных веществах: локальные магнитные поля на ядрах, явление усиления радиочастотного поля. Модели коэффициента усиления в доменах и доменных границах, мембранная модель.

Ядерный магнитный резонанс в слабых полях. Применения ЯМР в слабых магнитных полях.

Электронный парамагнитный резонанс (ЭПР). Электронный парамагнетизм, классы объектов, изучаемых методом ЭПР.

Ядерный квадрупольный резонанс (ЯКР). Ядерный электрический квадрупольный момент и его взаимодействие с градиентом напряженности электрического поля. Энергетические уровни, определяемые квадрупольными взаимодействиями, и их изменения под действием внешних электрических и магнитных полей.

Измерение времен ядерной магнитной релаксации. Диффузное затухание сигналов спинового эха и измерение коэффициентов самодиффузии. Применение импульсных градиентов магнитного поля для изучения медленной диффузии.

Квантовое усиление электромагнитных колебаний.

Квантовые генераторы. Квантовые усилители.

#### **4. Основы теоретической физики**

##### **4.1. Классическая механика**

Функция Лагранжа для системы с конечным числом степеней свободы. Принцип наименьшего действия. Уравнения Лагранжа. Функция Гамильтона. Уравнения Гамильтона. Законы сохранения энергии и импульса.

##### **4.2. Электродинамика**

*Электромагнитное поле в вакууме.* Напряженности и индукции электрического и магнитного полей. Потенциалы электромагнитного поля. Уравнения Максвелла в вакууме в присутствии внешних зарядов и токов. Закон сохранения энергии. Плотность и поток энергии электромагнитного поля. Плоские электромагнитные волны в вакууме. Частота, волновой вектор и поляризация электромагнитных волн. Дисперсия электромагнитных волн в вакууме. Элементы квантовой теории электромагнитного поля. Фотоны.

*Электромагнитное поле в веществе.* Макроскопические уравнения Максвелла в среде. Материальные уравнения. Диэлектрическая и магнитная проницаемости, удельная проводимость среды. Диэлектрическая восприимчивость среды с учетом эффектов запаздывания и диссипации энергии. Частотная дисперсия диэлектрической проницаемости. Вещественная и мнимая части диэлектрической проницаемости. Соотношения Крамерса-Кронига. Плоские электромагнитные волны в однородной изотропной, немагнитной среде. Комплексный показатель преломления. Оптические характеристики среды.

##### **4.3. Квантовая механика**

Уравнение Шредингера. Стационарные состояния. Дискретный и

непрерывный спектр энергий. Электрон в потенциальной яме. Гармонический осциллятор. Атом водорода. Квантовые числа и волновые функции. Спин электрона. Многоэлектронные системы и принцип Паули. Приближение Хартри и Хартри-Фока. Теория возмущений. Переходы под влиянием периодического возмущения. Золотое правило Ферми.

#### **4.4. Статистическая физика**

Большое каноническое распределение Гиббса. Химический потенциал. Распределение Ферми-Дирака и Бозе-Эйнштейна для идеальных газов. Переход к классическому распределению Больцмана. Вырожденный электронный газ. Излучение абсолютно черного тела.

### **5. Физика твердого тела**

#### **5.1. Структура и симметрия кристаллов**

Трансляционная симметрия кристаллов. Решетка Браве. Элементарная ячейка. Точечная симметрия кристаллов - симметрия направлений. Функции, периодические с периодом решетки, и их фурье-представление. Обратная решетка. Зона Бриллюэна.

#### **5.2. Макроскопические свойства твердых тел**

Тензорное описание физических свойств кристаллов. Материальные тензоры. Инвариантность материальных тензоров относительно точечной группы симметрии кристалла. Поляризация и электропроводность твердых тел. Тензоры диэлектрической проницаемости и удельной проводимости. Эффект Холла в кристаллах. Тензор холловской проводимости. Упругие свойства кристаллов. Тензор механических напряжений и тензор деформаций. Упругие волны в кристаллах. Пьезоэлектрический и электрооптический эффекты в кристаллах.

#### **5.3. Колебания атомов в твердых телах**

Гармоническое приближение в теории колебания решетки. Преобразование Фурье для функций заданных на решетке. Динамическая матрица. Собственные колебательные моды. Волны в одномерной цепочке с одним и двумя различными атомами в элементарной ячейке. Дисперсия акустических и оптических мод. Колебательные спектры трехмерных кристаллов. Квантовая теория колебания решетки. Фононы.

#### **5.4. Зонная структура твердых тел**

Одночастичное приближение в физике твердого тела. Уравнение Шредингера

для электрона в периодическом поле. Волновой вектор электрона. Теорема Блоха. Зонная структура твердых тел в приближение слабой и сильной связи. Схема расширенных и приведенных зон.

Принцип Паули и заполнение одночастичных состояний электронами при  $T=0$ . Уровень Ферми. Свойства полностью заполненных зон. Диэлектрики, полупроводники, металлы. Свойства частично заполненных зон в полупроводниках. Электроны и дырки. Квазиклассическая динамика электронов и дырок во внешних полях. Эффективная масса носителей заряда.

## **6. Физика полупроводников**

### **6.1. Кристаллическая структура полупроводников**

Полупроводниковые кристаллы со структурой алмаза, сфалерита и вюрцита. Их точечная симметрия. Прямая и обратная решетки. Зоны Бриллюэна.

### **6.2. Зонная структура полупроводников**

Дисперсия электронов в направлениях и точках высокой симметрии в зоне Бриллюэна. Кр-теория возмущений. Зонные параметры. Эффективная масса. Прямозонные и непрямоzonные многодолинные полупроводники. Зонная структура кубических полупроводников Ge, Si и  $A^3B^5$  без учета и с учетом спина и спин-орбитального взаимодействия. Зона легких и тяжелых дырок. Кратность вырождения в точках экстремума.

Плотность энергетических состояний в зонах. Эффективная масса плотности состояний в зоне проводимости и валентной зоне кубических полупроводников.

### **6.3. Приближение эффективной массы**

Метод огибающих волновых функций в теории полупроводников. Эффективный кр-гамильтониан. Мелкие примеси и экситоны в приближении эффективной массы. Водородоподобная модель.

Квантово-размерные полупроводниковые гетероструктуры в приближении эффективной массы. Квантовые ямы, проволоки, точки, сверхрешетки. Эффективные кр-гамильтонианы для электронов и дырок. Уровни (подзоны) размерного квантования и огибающие волновые функции носителей заряда. Плотность энергетических состояний в 0-D, 1-D и 2-D системах.

### **6.4. Оптические свойства полупроводников**

Связь коэффициента поглощения с вероятностью оптических переходов. Золотое правило Ферми. Оптические переходы с участием мелких водородоподобных примесей в полупроводниках. Вероятность процессов

фотовозбуждения и фотоионизации. Спектр примесного поглощения.

Край собственного поглощения полупроводников. Прямые оптические переходы электронов из валентной зоны в зону проводимости. Непрямые оптические переходы с участием фононов. Зависимость коэффициента поглощения от энергии фотонов. Учет экситонных эффектов. Прямые и непрямые экситоны. Экситонная зонная структура. Оптические переходы в экситонные состояния. Спектр поглощения прямозонных и непрямозонных полупроводников с учетом экситонных эффектов.

### **6.5. Статистика электронов в полупроводниках**

Распределение Ферми-Дирака для идеального ферми-газа. Функция распределения для электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне. Уравнение электронейтральности. Зависимость положения уровня Ферми и концентрации свободных носителей заряда от температуры в собственном полупроводнике.

Статистика заполнения примесных состояний в полупроводниках. Фактор вырождения. Уравнение электронейтральности в легированных полупроводниках. Зависимость положения уровня Ферми и концентрации свободных носителей заряда от температуры и уровня легирования материала донорами и акцепторами.

### **6.6. Кинетические явления в полупроводниках**

Классическая теория электропроводности Друде. Время релаксации, подвижность, удельная проводимость. Эффект Холла и коэффициент Холла.

Неравновесная функция распределения. Кинетическое уравнение Больцмана. Приближение времени релаксации. Механизмы рассеяния носителей заряда. Зависимость вероятности рассеяния от энергии носителя заряда и температуры. Тензор удельной проводимости полупроводников и его зависимость от температуры. Тензор холловской проводимости полупроводников. Термоэлектрические эффекты в полупроводниках: эффект Зеебека и Пельтье.

### **6.7. Неравновесные носители заряда**

Неравновесные носители заряда в полупроводниках. Время жизни неравновесных носителей. Квазиуровни Ферми. Диффузия и дрейф. Соотношение Эйнштейна для невырожденных полупроводников. Фотопроводимость полупроводников. Эффект Дембера.

Процессы рекомбинации в полупроводниках. Механизмы люминесценции. Фото- и электролюминесценция полупроводников. Безызлучательные переходы. Эффект Оже.

### **Литература к разделу 1.**

1. Карлов Н.В., Кириченко Н.А. Колебания, волны, структуры. - М.: Физматлит, 2001.
2. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. М.: Наука, 1990.
3. Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Основы теории колебаний и волн. М.: Наука, 1987.
4. Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн. - М.: Наука, 1978.
5. Гольдштейн Л.Д., Зернов Н.В. Электромагнитные поля и волны. - М.: Советское Радио, 1971 г.
6. Марков Г.Т., Чаплин А.Ф. Возбуждение электромагнитных волн. М.-Л., Энергия, 1966.
7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М., Наука, 1982.
8. Вайнштейн Л.А. "Электромагнитные волны". М., Радио и связь, 1988.
9. Каценеленбаум Б.З. "Высокочастотная электродинамика". М., Наука, 1966.
10. Левин Л. Теория волноводов. Методы решения волноводных задач. М., Радио и связь, 1981.
11. Бредов М.М., Румянцев В.В., Топтыгин И.Н. Классическая электродинамика. - М.: Наука, 1985.
12. Франк И.М. Излучение Вавилова-Черенкова. Вопросы теории. - М.: Наука, 1988.
13. Гинзбург В.Л., Цытович В.Н. Переходное излучение и переходное рассеяние. - М.: Наука, 1984.
14. Тюхтин А.В. Электромагнитное излучение заряженной частицы, движущейся в изотропной среде. Учебное пособие. СПб, СПб., изд-во СПбГУ, 2004.
15. Рязанов М.И. Введение в электродинамику конденсированного вещества. М. Физ- матлит 2002.

### **Литература к разделу 2.**

1. Исакович М.А. Общая акустика.-М.: Наука, 1973.

2. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах.- М.: Наука, 1973.
3. Шендеров Е.Л. Волновые задачи гидроакустики.- Л.: Судостроение, 1972.
4. Римский-Корсаков А.К. Электроакустика.- М.: Связь, 1973.
5. Свердлин Г.М. Прикладная гидроакустика.-Л. Судостроение, 1976.
6. Лепендин Л.Ф. Акустика.-М.: Высшая школа, 1978.
7. Виноградова М.Е., Руденко О.В., Сухоруков А.Н. Теория волн.- М.: Наука, 1990.
8. Шутилов В.А. Основы физики ультразвука - Л.: Изд-во ЛГУ.
9. Викторов И.А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах.- М.: Наука, 1981.
10. Новиков Б.К., Руденко О.В., Тимошенко В.И. Нелинейная гидроакустика.- Л.: Судостроение, 1981.
11. Смартышев М.Д., Добровольский Ю.Ю. Гидроакустические антенны. - Л.: Судостроение, 1984.
12. Красильников В.А., Крылов В.В. Введение в физическую акустику.- М.: Наука, 1984.
13. Агранат Б.А., Дубровин М.Н., Хавский Н.Н. Эскин Г.И. Основы физики и техники ультразвука. - М.: Высшая школа, 1987.
14. Щевьев Ю.П. Физические основы архитектурно-строительной акустики - СПб: Изд- во СПГУКиТ, 2000.
15. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 Т., Под общ. Ред. В.В.Клюева, Т.№: Ультразвуковой контроль/ И.Н.Ермолов, Ю.В. Ланге.- М.: Машиностроение, 2004.
16. Карлов Н.В., Кириченко Н.А. Колебания, волны, структуры. - М.: Физматлит, 2001.

### **Литература к разделу 3.**

1. Квантовая радиофизика. Магнитный резонанс и его приложения. Под ред. Чижика В.И., СПб, СПбГУ, 2009. 700 стр.
2. А. Абрагам "Ядерный магнетизм". ИЛ. 1963 г.
3. Ч.Сликтер "Основы теории магнитного резонанса", "Мир", М., 1981 г.
4. Физические основы квантовой радиофизики. Учебное пособие под редакцией П.М.Бородина и Л.Н.Лабзовского, изд. ЛГУ. 1985 г.
5. В.И. Чижик. Ядерная магнитная релаксация. Учебное пособие. 2-е изд. СПбГУ, 2001.385 с.
6. Дж. Уо. Новые методы ЯМР в твердых телах. М., Мир, 1978

7. А.Г.Лундин, Э.С.Федин. ЯМР спектроскопия. Наука, 1986 г
8. Бородин П.М., Мельников А.В., Морозов А.А., Чернышев Ю.С. "Ядерный магнитный резонанс в земном поле", Л., ЛГУ, 1967 г.
9. А.А. Вашман, И.С. Пронин. Ядерная магнитная релаксационная спектроскопия. М., 1986 г.
10. В.С.Г речишкин: Ядерные квадрупольные взаимодействия в твердых телах. М., Наука, 1973.
11. С.А. Альтшулер, В.М. Козырев. Электронный парамагнитный резонанс соединений элементов промежуточных групп. М. 1963.
12. А. Сигмен. Мазеры. М., Мир. 1966.
- Г.М. Страховский, А.В. Успенский. Основы квантовой электроники. М., Высш. школа. 1979 г.

#### **Литература к разделу 4.**

1. Глинский Г.Ф. Полупроводники и полупроводниковые наноструктуры: симметрия и электронные состояния. СПб, «Технолит», 2008. 324 с.
2. Глинский Г.Ф. Методы теории групп в квантовой механике. СПб, Из-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. 200 с.
3. Нанотехнология: физика, процессы, диагностика, приборы/ Под ред. Лучинина В.В., Таирова Ю.М.-М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 552 с.
4. Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твердого тела. Т.1,2. М., Мир, 1979.
5. Зегря Г.Г., Перель В.И. Основы физики полупроводников. М., Физматлит 2009.
6. Ансельм А. И. Введение в теорию полупроводников. - М.: Наука, 1987.

#### **Литература к разделу 5.**

1. Левич В.Г. Курс теоретической физики. - М.: Наука, 1969. - Т.1,2.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. - М.: Наука, 1976. - Ч.1.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика. - М.: Наука, 1989.
4. Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твердого тела. - М.: Мир, 1979. - Т.1,2.
5. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников. - М.: Наука, 1978.
6. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. - М.: Наука, 1977.
7. Шалимова К.В. Физика полупроводников. - М.: Энергоатомиздат, 1985.



8. Блейкмор Дж. Физика твердого тела. - М.: Мир, 1988.
9. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники. - М.: Высшая школа, 1986.
10. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов. - М.: Энергоиздат, 1982.
11. Пихтин А.Н. Физические основы квантовой электроники и оптоэлектроники. - М.: Высшая школа, 1983.
12. Ормонт Б.Ф. Введение в физическую химию и кристаллохимию полупроводников и диэлектриков. - М.: Высшая школа, 1973.
13. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы. - М.: Высшая школа, 1986.
14. Пичугин И.Г., Таиров Ю.М. Технология полупроводниковых приборов. - М.: Высшая школа, 1984.
15. Преображенский А.А. Магнитные материалы и элементы. - М.: Высшая школа, 1976.
16. Таиров Ю.М., Цветков В.Ф. Технология полупроводниковых материалов. - М.: Высшая школа, 1983.

Утверждено на заседании кафедры физики

« 19 » 02 2020 г., протокол № 5

Зав. кафедрой физики

С.Н.Колгатин

Программу составил д.т.н., проф., зав.  
кафедрой физики

С.Н.Колгатин

Проректор по научной работе

А.В. Шестаков