

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»,

«Физика конденсированного состояния»

Ярославль 2018

РАЗДЕЛ 1. Классическая теория поля, квантовая механика и статистическая физика, квантовая теория поля

1. Аналитическая механика и классическая теория поля

Принцип наименьшего действия в механике. Уравнение Лагранжа. Функция Гамильтона. Уравнение Гамильтона. Малые колебания многомерных систем. Собственные частоты. Нормальные координаты. Электромагнитное поле в классической физике. Уравнения Максвелла в вакууме. Уравнение непрерывности. Уравнение движения заряженной частицы в электромагнитном поле. Мультипольные моменты системы зарядов. Энергия системы зарядов во внешнем магнитном поле. Излучение электромагнитных волн (дипольное и магнито-дипольное излучения). 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 тока вероятности и уравнение непрерывности. Линейный одномерный осциллятор. Движение в центрально-симметричном поле. Момент импульса в квантовой механике. Атом водорода. Стационарная теория возмущений в квантовой механике. Нестационарная теория возмущений. Теория квантовых переходов. Спин, оператор спина. Собственные значения и собственные функции оператора спина электрона. Уравнение Паули. Принцип Паули. Связь спина со статистикой. Термодинамические потенциалы. Энтропия. Каноническое распределение Гиббса. Свободная энергия больцмановского идеального газа. Уравнение состояния. Распределение Бозе-Эйнштейна. Вырожденный Бозе-газ. Излучение абсолютно черного тела. Распределение Ферми-Дирака. Вырожденный Ферми-газ. Электронный газ в металле.

3. Релятивистские уравнения и формализм квантовой теории поля

Уравнение Клейна-Гордона-Фока для скалярной частицы. Включение внешнего поля. Калибровочная инвариантность. Релятивистское уравнение Дирака. Вероятностная интерпретация волновой функции. Решение свободного уравнения Дирака в виде плоских волн. Спиновый, орбитальный и полный моменты количества движения. Уравнение Дирака во внешнем электромагнитном поле. Тонкое расщепление водородоподобных уровней. Классические поля. Действие в теории поля. Лагранжев формализм. Теорема Нетер. Законы сохранения в теории поля. Квантование скалярных и фермионных полей. Пропагаторы скалярного, фермионного и векторного полей.

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 и правила Фейнмана в КХД. Единая электрослабая теория Вайнберга-Салама-Глэшоу. Сектор векторных бозонов. Скалярный сектор теории. Возникновение масс промежуточных бозонов. Фермионный сектор. Механизм появления масс фермионов. Смешивание поколений.

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. Физика сплошных сред

1. Гидромеханика

Понятие сплошной среды. Микроскопические, статистические и макроскопические феноменологические методы описания свойств, взаимодействий и движений материальных сред. Области приложения механики жидкости, газа и плазмы. Лагранжевы и эйлеровы координаты. Инерциальные и неинерциальные системы отсчета в ньютоновской механике. Кинематические свойства вихрей. Закон сохранения массы. Уравнение неразрывности в переменных Эйлера и Лагранжа. Условие несжимаемости. Законы сохранения количества движения и моментов количества движения для конечных масс сплошной среды. Дифференциальные уравнения движения и момента количества движения сплошной среды. Закон сохранения энергии, внутренняя энергия. Диссипативная функция. Основные макроскопические механизмы диссипации. Модель идеальной жидкости. Уравнения Эйлера. Полные системы уравнений для идеальной, несжимаемой и сжимаемой жидкостей. 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. Тангенциальные разрывы. Неустойчивость Кельвина-Гельмгольца. Равновесие и устойчивость плавающих тел и атмосферы. Теория пограничного слоя. Турбулентность. Ламинарное движение несжимаемой вязкой жидкости. Ламинарный пограничный слой. Пограничный слой у свободной поверхности вязкой жидкости. Свободная и вынужденная конвекция. Приближение Буссинеска. Линейная неустойчивость подогреваемого плоского слоя и порог возникновения конвекции.

2. Волновое движение

Гравитационные волны. Длинные волны. Внутренние волны в несжимаемой жидкости. Волновые движения в многослойной идеальной жидкости. Капиллярность. Капиллярные волновые движения. Капиллярные волны (осесимметричные и неосесимметричные) на поверхности цилиндрической струи несжимаемой идеальной жидкости. Осцилляции капли идеальной жидкости. Осцилляции капли идеальной жидкости. Нелинейные осцилляции и волны.

3. Электродинамические неустойчивости

Неустойчивость Рэлея заряженной капли. Неустойчивость Тейлора незаряженной капли во внешнем однородном электростатическом поле. Неустойчивость Кельвина-Гельмгольца на заряженной границе раздела сред. Осесимметричные и неосесимметричные капиллярные волны на поверхности заряженной цилиндрической струи идеальной и вязкой жидкостей. Устойчивость капиллярных волн на поверхности заряженной цилиндрической струи идеальной и жидкости в поперечном оси симметрии струи электрическом поле. Осцилляции заряженной капли вязкой несжимаемой жидкости.

Литература

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика М.: Наука, 1986.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая механика. М.: Наука, 1988.
3. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1978.
4. Сретенский Л.Н. Теория волновых движений жидкости. М.: Наука, 1977.
5. Ланда П.С. Нелинейные колебания и волны. М.: URSS, 2010. 552 с.
6. Мейз Дж. Теория и задачи механики сплошных сред. М.: URSS, 2007. 318 с.
7. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. Ч. I, II. М.: Физматгиз, 1963.
8. Седов Л.И. Механика сплошной среды. Т. I, II. 5-е изд. М.: Наука, 1994.
9. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. 10-е изд. М.: Наука, 1987.
10. Черный Г.Г. Газовая динамика. М.: Наука, 1988.
11. Слезкин Н.А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости. М.: Гос. изд-во физ.-тех. лит-ры, 1955.
12. Прандтль Л. Гидроаэромеханика. РХД, 2000.
13. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974.
14. Седов Л.И. Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики. 3-е изд. М.: Наука, 1980.
15. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1976.
16. Механика сплошных сред в задачах. Т. 1, 2 / Г.Я. Галин, А.Н. Голубятников, Я.А. Каменярж и др. М.: Московский лицей, 1996.
17. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная неустойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука, 1972.
18. 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. 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. Магнитные свойства твердых тел

Физическая классификация магнетиков. Диамагнетизм. Теория Ланжевена. Диамагнетизм сферически несимметричных систем. Диамагнетизм Ландау. Парамагнетизм. Учет пространственного квантования в классической теории парамагнетизма. Законы Кюри и Кюри-Вейса для парамагнетиков. 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.

8. 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 низкоразмерных систем

1. Основные закономерности строения полупроводников

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 $A^{III}B^V$, $A^{II}B^{VI}$, $A^{IV}B^{VI}$.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

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. Нанозлектроника. 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. Генерирование, преобразование и распространение колебаний и волн

1. Динамика колебательных систем

Уравнения колебательных систем. Уравнения систем с малым параметром. Гамильтоновы системы.

Линейная и нелинейная консервативные системы с одной степенью свободы. Исследование фазового портрета. Зависимость частоты колебания от амплитуды.

Линейная и нелинейная диссипативные системы с постоянным трением. Исследование фазового портрета.

Резонанс в системе с нелинейной восстанавливающей силой.

Внешнее периодическое воздействие на автогенератор. Синхронизация генератора.

2. Преобразование процессов в динамических системах

Преобразование детерминированных и случайных процессов в линейных системах. Характеристики процессов в установившемся режиме.
Преобразование детерминированных и случайных процессов в нелинейных системах. Характеристики процессов в установившемся режиме.
Оптимальная фильтрация по критерию максимума отношения сигнал/шум. Согласованный фильтр.
Оптимальная фильтрация по критерию минимума среднего квадрата ошибки. Фильтр Винера.

3. Электромагнитные волны

Электромагнитные волны в однородных и изотропных средах.
Волны в анизотропных средах. Общие закономерности процессов распространения.

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 №5 от 19 декабря 2017 года).