

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
Факультет наук о материалах

УТВЕРЖДАЮ
Зам. декана ФНМ по учебной
работе
_____/А.В. Кнотько /
«__» _____ 2016 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Наименование дисциплины:

Физика твердого тела и полупроводников

Уровень высшего образования:
бакалавриат

Направление подготовки:
04.03.02 Химия, физика и механика материалов

Направленность (профиль)/специализация ОПОП:
общий

Форма обучения:
очная

Рабочая программа рассмотрена и одобрена
Методической комиссией факультета наук о материалах
(протокол №_____, дата)

Москва 2016

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлению подготовки «Химия, физика и механика материалов» (программы бакалавриата, магистратуры, реализуемых последовательно по схеме интегрированной подготовки) в редакции приказа МГУ от _____20__ г.

1. Место дисциплины в структуре ОПОП ВО: Базовая часть, блок профессиональной подготовки, модуль «Физика конденсированного состояния», курс предназначен для студентов факультета наук о материалах **3-го года обучения (6-й семестр)**, курс является **обязательным**

2. Входные требования для освоения дисциплины, предварительные условия (если есть):

Изучение дисциплин:

Математический анализ

Дифференциальные уравнения

Высшая алгебра и аналитическая геометрия

Общая физика

Квантовая физика

Статистическая физика

3. Результаты обучения по дисциплине:

Знать: основные положения теории колебаний атомов кристаллической решетки, зонную теорию твердого тела, приближенные методы решения уравнения Шредингера для электрона в кристалле, основы динамики движения электронов и дырок в кристалле, в том числе в присутствии магнитного поля;

основные положения зонной теории полупроводников, зонные структуры основных полупроводниковых материалов, основы равновесной и неравновесной статистики носителей заряда, контактных, поверхностных и кинетических явлений в полупроводниках.

Уметь: строить обратные решетки, зоны Бриллюэна и поверхности Ферми металлов для основных типов кристаллических решеток, использовать основные понятия зонной теории твердого тела и концепцию квазичастиц (фононы, электроны, дырки, полярон, экситон и т.д.) при анализе физических явлений в твердых телах;

проводить расчеты основных параметров электронной структуры, температурных зависимостей уровня Ферми и концентраций носителей заряда, параметров, характеризующих неравновесные, контактные, поверхностные и кинетические эффекты в полупроводниках, использовать полученные знания для теоретического описания и экспериментального изучения физических явлений в полупроводниках.

4. Объем дисциплины составляет 6 з.е. (216 ак.ч.)

5. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий:

5.1. Структура дисциплины по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий (в строгом соответствии с учебным планом)

| Вид работы | Семестр | | | | Всего |
|--|---------|--|--|--|-------|
| | 6 | | | | |
| Общая трудоёмкость, акад. Часов | 216 | | | | 216 |
| Аудиторная работа: | 120 | | | | 120 |
| Лекции, акад. Часов | 75 | | | | 75 |
| Семинары, акад. Часов | 45 | | | | 45 |
| Лабораторные работы, акад. часов | | | | | |
| Самостоятельная работа, акад. часов | 96 | | | | 96 |

| | | | | | |
|--|------|--|--|--|--|
| Вид итогового контроля (зачёт, экзамен) | Экз. | | | | |
|--|------|--|--|--|--|

5.2. Содержание разделов (тем) дисциплины

Физика твердого тела:

1. ВВЕДЕНИЕ

(лекции - 2 часа, семинары - 4 часа)

Предмет и структура курса. Кристаллическая решетка и структура кристаллов (базис, вектор трансляции, решетка Бравэ, примитивная и элементарная ячейки, индексы Миллера). Обратная решетка.

Химическая связь в кристаллах. Классификация твердых тел по величине и температурной зависимости электропроводности. Классическая теория металлов (основные предположения, электропроводность и теплоемкость твердых тел).

Особенности задач по физике твердого тела. Типичные приемы и методы их решения. Оценки характерных размеров, скоростей и сил в твердых телах. Построение обратных решеток для одно-, двух- и трехмерных решеток.

2. ДИНАМИКА КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ

(лекции - 8 часов, семинары - 4 часа)

Общая модель колебаний атомов в кристаллической решетке. Нулевые колебания. Квантовые кристаллы и жидкости.

Колебания одномерной одноатомной решетки (закон дисперсии, зоны Бриллюэна, циклические граничные условия Борна-Кармана). Колебания одномерной двухатомной решетки. Акустические и оптические колебания. Изменение закона дисперсии колебаний атомов решетки при учете взаимодействия с удаленными атомами.

Фононы. Температура Дебая. Колебания атомов трехмерной решетки (продольные и поперечные фононы, форма зоны Бриллюэна, температура Дебая).

Спектральная плотность фононов для одно-, двух- и трехмерных кристаллов. Основные предположения модели Дебая и вычисление спектральной плотности акустических фононов для изотропного кристалла.

Спектральная плотность оптических фононов. Поверхности постоянной частоты и спектральная плотность фононов в реальных кристаллах.

Теплоемкость кристаллической решетки. Теории Эйнштейна и Дебая. Температурная зависимость теплоемкости твердых тел.

Ангармонизм колебаний атомов решетки и его следствия. Тепловое расширение твердых тел. Фонон-фононное рассеяние (нормальные процессы и процессы переброса). Фононная теплопроводность и ее зависимость от температуры.

3. ЗОННАЯ ТЕОРИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА

(лекции - 8 часов, семинары - 6 часов)

Уравнение Шредингера для кристалла. Адиабатическое приближение. Одноэлектронное приближение и метод самосогласованного поля.

Волновая функция электрона в кристалле. Условие трансляционной симметрии волновой функции. Теорема Блоха. Квазиимпульс электрона в кристалле. Скорость электрона. Закон изменения квазиимпульса. Дискретность квазиимпульса. Зоны Бриллюэна. Дифракция электронной волны в кристалле. Методы построения зон Бриллюэна.

Приближенные методы решения одноэлектронного уравнения Шредингера (обзор). Одномерное движение электрона в периодическом потенциале: модель Кронига-Пенни.

Приближение почти свободных электронов (ПСЭ): зонные схемы, решение уравнения Шредингера. Заполнение зон Бриллюэна электронами в металлах. Метод Харрисона построения поверхностей Ферми металлов.

Метод сильной связи (МСС): решение уравнения Шредингера для простой кубической решетки. Заполнение энергетических зон электронами и классификация твердых тел (металлы, полупроводники, диэлектрики).

4. ДИНАМИКА ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОНА В КРИСТАЛЛЕ

(лекции - 8 часов, семинары - 6 часов)

Эффективная масса электрона в кристалле. Изоэнергетические поверхности вблизи экстремумов энергии. Классификация законов дисперсии. Неквадратичные законы дисперсии в приближении ПСЭ и МСС.

Движение электрона в постоянном электрическом поле. Дырки. Перенормировка эффективной массы в результате взаимодействия электрона с решеткой. Полярон.

Плотность электронных состояний и ее зависимость от размерности кристалла. Эффективная масса плотности состояний. Сингулярности Ван Хофа. Электронные топологические переходы И.М. Лифшица.

Метод эффективной массы. Элементарная теория примесных состояний. Водородоподобная модель примеси. Примесные зоны. Экситон.

Движение электрона в постоянном магнитном поле: траектория движения, циклотронная эффективная масса, электронные и дырочные орбиты. Циклотронный резонанс.

Квантование энергии электрона в магнитном поле. Уровни Ландау. Распределение электронов в пространстве квазиимпульса. Спиновое расщепление уровней Ландау. Спиновая эффективная масса. Плотность состояний и концентрация электронов в квантующем магнитном поле.

Квантовые осцилляционные явления. Формула Лифшица-Онзагера.

Физика полупроводников

1. ЗОННАЯ СТРУКТУРА РЕАЛЬНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

(лекции - 7 часов, семинары - 4 часа)

Предмет и структура курса. Классификация полупроводниковых материалов. Параметры зонной структуры полупроводников.

Зонная структура германия и кремния.

Зонная структура полупроводников A^3B^5 .

Зонная структура полупроводников A^2B^6 .

Зонная структура полупроводников A^4B^6 .

Локализованные состояния в полупроводниках. Мелкие и глубокие уровни точечных дефектов. Резонансные уровни в энергетическом спектре полупроводников.

2. СТАТИСТИКА НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

(лекции - 7 часов, семинары - 7 часов)

Равновесная функция распределения электронов и дырок по состояниям. Энергия Ферми. Вырожденные и невырожденные полупроводники. Функция плотности состояний и ее вычисление для квадратичных и неквадратичных законов дисперсии. Эффективная масса плотности состояний.

Вычисление концентраций свободных электронов и дырок. Интегралы Ферми. Приближенные формулы для вычисления интегралов Ферми. Уравнение электронейтральности. Функции распределения электронов и дырок по локализованным состояниям.

Статистика собственного полупроводника. Решения уравнения электронейтральности для невырожденного и вырожденного собственных полупроводников. Определение ширины запрещенной зоны по температурной зависимости концентрации носителей заряда в собственном полупроводнике.

Статистика невырожденного полупроводника с одним типом примеси. Температурные зависимости концентрации носителей заряда и энергии Ферми. Нижняя и верхняя температуры истощения примеси. Определение энергии активации примеси по температурной зависимости концентрации носителей заряда.

3. НЕРАВНОВЕСНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

(лекции - 7 часов, семинары - 4 часа)

Равновесные, неравновесные и избыточные носители заряда в полупроводниках. Квазиуровни Ферми.

Эффективное сечение рекомбинации и среднее время жизни неравновесных носителей заряда. Основные механизмы рекомбинации и генерации неравновесных носителей заряда. Инжекция в p-n-переходе. Максвелловское время релаксации.

Уравнение непрерывности. Примеры использования уравнения непрерывности (рекомбинация носителей заряда при моно- и биполярной генерации, релаксация избыточной концентрации при наличии внешнего возбуждения). Мгновенное время жизни.

Межзонная рекомбинация. Теория Ван Русбрека-Шокли. Вычисление максимального времени жизни при излучательной межзонной рекомбинации. Зависимости времени жизни от уровня возбуждения, степени легирования полупроводника и температуры.

Диффузионный и дрейфовый токи в полупроводниках. Соотношение Эйнштейна. Диффузия и дрейф неравновесных избыточных носителей заряда в примесном полупроводнике. Диффузионная и дрейфовая длины.

4. КОНТАКТНЫЕ И ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

(лекции - 7 часов, семинары - 3 часа)

Полупроводник во внешнем электрическом поле. Изгиб энергетических зон в поверхностном слое и дебаевская длина экранирования.

Термодинамическая работа выхода электрона. Контакт металл-металл. Контактная разность потенциалов.

Контакт металл-полупроводник. Энергетические диаграммы идеальных контактов. Глубина проникновения контактного поля в полупроводник и барьерная емкость контакта. Барьер Шоттки и его практическое применение. Вольтамперная характеристика (ВАХ) барьера Шоттки.

Электронно-дырочный переход. Контактная разность потенциалов. Размер области существования объемного заряда и барьерная емкость p-n-перехода. Выпрямляющие свойства p-n-перехода. Идеальная ВАХ и величина тока насыщения для p-n-перехода.

Поверхностные состояния. Поверхностный потенциал и приповерхностный объемный заряд. Поверхностная проводимость. Эффект поля и его практическое применение.

5. ТЕОРИЯ РАССЕЯНИЯ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

(лекции - 4 часа, семинары — 3 часа)

Кинетическое уравнение Больцмана. Приближение времени релаксации. Механизмы рассеяния носителей заряда в полупроводниках. Эффективное сечение рассеяния и его связь со временем релаксации. Вычисление времени релаксации при рассеянии на ионах примеси (методы Конуэлл-Вайскопфа и Брукса-Херринга).

Время релаксации при рассеянии электронов на нейтральных атомах примеси, точечных дефектах и дислокациях. Рассеяние электронов на акустических и оптических фононах (рассеяние на деформационном потенциале и полярное рассеяние).

6. КИНЕТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

(лекции - 7 часов, семинары - 4 часов)

Общее решение кинетического уравнения Больцмана. Кинетические коэффициенты. Вычисление кинетических коэффициентов для вырожденных и невырожденных полупроводников.

Классификация кинетических явлений. Гальваномагнитные, термоэлектрические и термомагнитные эффекты (качественное рассмотрение).

Электропроводность однодолинного и многодолинного полупроводников. Эффективная масса проводимости. Температурные зависимости подвижности носителей заряда и электропроводности в полупроводниках.

Эффект Холла в полупроводниках с одним и несколькими типами носителей заряда.

Эффект магнитосопротивления в ограниченном и неограниченном полупроводниках.

Электронная теплопроводность твердых тел. Число Лоренца.

Эффект Зеебека в полупроводниках с одним и несколькими типами носителей заряда.

Дифференциальная и интегральная термоэдс. Практические применения эффекта Зеебека (термопара, термогенераторы).

6. Фонд оценочных средств (ФОС, оценочные и методические материалы) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).

6.1. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости, критерии и шкалы оценивания (в отсутствие утвержденных соответствующих локальных нормативных актов на факультете)

Список контрольных вопросов
по разделу «физика твердого тела»

1. Кристаллическая решетка (базис, примитивная и элементарная ячейки, обратная решетка).
2. Колебания атомов решетки, акустические и оптические фононы.
3. Спектральная плотность акустических фононов, модель Дебая.
4. Фононы. Температура Дебая.
5. Расчет температуры Дебая для одномерной одноатомной решетки в дебаевском приближении.
6. Теплоемкость кристаллической решетки. Модель Эйнштейна.
7. Тепловое расширение твердых тел.
8. Рассеяние фононов.
9. Адиабатическое и одноэлектронное приближения.
10. Теорема Блоха.
11. Дискретность квазиимпульса.
12. Зоны Бриллюэна для трехмерных кристаллов.
13. Приближение почти свободных электронов (ПСЭ), зонные схемы.
14. Закон дисперсии носителей заряда в кубической решетке в методе сильной связи (МСС).
15. Построение изоэнергетических поверхностей для плоской квадратной решетки в рамках ПСЭ и МСС.
16. Метод Харрисона построения поверхностей Ферми металлов.
17. Эффективная масса электрона в кристалле.
18. Перенормировка эффективной массы, полярон.
19. Закон изменения квазиимпульса электрона в кристалле.
20. Типы законов дисперсии и форма изоэнергетических поверхностей.
21. Плотность электронных состояний.
22. Элементарная теория примесных состояний.
23. Понятие экситона.
24. Циклотронная эффективная масса.
25. Электрон в квантующем магнитном поле, уровни Ландау.

Список контрольных вопросов
по разделу «физика полупроводников»

1. Параметры зонной структуры полупроводников.
2. Зонная структура германия и кремния.
3. Зонная структура полупроводников A^2B^6 .
4. Водородоподобная модель примеси.
5. Мелкие и глубокие уровни в полупроводниках.
6. Функция плотности электронных состояний. Эффективная масса плотности состояний.
7. Уравнение электронейтральности.
8. Статистика собственного полупроводника.
9. Температурная зависимость концентрации электронов в донорном полупроводнике.
10. Нижняя и верхняя температуры истощения.

11. Вырожденные примесные полупроводники.
12. Основные механизмы рекомбинации и генерации неравновесных носителей заряда.
13. Максвелловское время релаксации.
14. Уравнение непрерывности и примеры использования.
15. Межзонная рекомбинация. Теория Ван Русбрека-Шокли.
16. Диффузионный и дрейфовый токи в полупроводниках.
17. Диффузионная и дрейфовая длины.
18. Полупроводник во внешнем электрическом поле. Дебаевская длина экранирования.
19. Энергетические диаграммы идеальных контактов металл-полупроводник.
20. Работа выхода и контактная разность потенциалов.
21. Вольтамперная характеристика p-n-перехода.
22. Поверхностные состояния и изгиб энергетических зон в приповерхностном слое.
23. Поверхностная проводимость.
24. Кинетическое уравнение Больцмана.
25. Рассеяние электронов на акустических и оптических фононах.
26. Температурная зависимость подвижности носителей заряда в полупроводниках.
27. Эффект Холла в полупроводнике с одним типом носителей заряда.
28. Эффект Зеебека в полупроводнике с одним типом носителей заряда.

Список тем рефератов

1. Фундаментальные и характеристические параметры полупроводников.
2. Классификация примесных состояний в полупроводниках.
3. Способы и методы исследования зонного энергетического спектра полупроводников.
4. Эффект Шубникова-де Гааза в применении к исследованиям энергетического спектра полупроводников.
5. Сравнительный анализ температурных зависимостей концентрации носителей заряда, электропроводности и коэффициента Холла в примесных полупроводниках.
6. Основные методы синтеза монокристаллов полупроводников.
7. Физические и химические методы контроля чистоты полупроводниковых материалов.
8. Основные методы выращивания пленок полупроводниковых соединений.
9. Области применения полупроводников.
10. Полупроводники для светоизлучающих и фотоприемных устройств.
11. Методы вариации фундаментальных и характеристических параметров полупроводников.
12. Полупроводники - сегнетоэлектрики.
13. Сверхпроводимость в полупроводниках.
14. Полупроводники для термоэлектрических преобразователей.
15. Способы и методы выведения электронной системы полупроводника из состояния равновесия с помощью различных физических воздействий.
16. Физические принципы и технология создания барьеров Шоттки и омических контактов к полупроводникам.
17. Шкала времен релаксаций электронных распределений в полупроводниках, содержащих примеси и собственные дефекты.
18. Объемно-неравновесные состояния и неустойчивости в полупроводниковых структурах.
19. Гетеропереходы.
20. Энергетический спектр молекулярных полупроводников и полупроводников с аномально малой подвижностью носителей заряда.

6.2. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации по дисциплине (модулю), критерии и шкалы оценивания (в отсутствие утвержденных соответствующих локальных нормативных актов на факультете)

Список вопросов к экзамену по разделу «физика твердого тела»

1. Кристаллическая решетка. Базис. Прimitivesкая ячейка. Классификация решеток Бравэ. Обратная решетка.
2. Типы химической связи. Классическая теория металлов: основные предположения, электропроводность.
3. Общая модель колебаний атомов в кристаллической решетке. Нулевые колебания. Квантовые кристаллы.
4. Колебания атомов одномерной одноатомной решетки.
5. Колебания атомов одномерной двухатомной решетки. Акустические и оптические колебания.
6. Изменение закона дисперсии колебаний одномерной решетки при учете взаимодействия с удаленными атомами.
7. Фононы. Температура Дебая. Колебания атомов трехмерной решетки.
8. Спектральная плотность состояний акустических фононов. Вычисление спектральной плотности для изотропного кристалла.
9. Спектральная плотность состояний оптических фононов. Поверхности постоянной частоты и спектральная плотность фононов в реальных кристаллах.
10. Теплоемкость твердых тел. Теории Эйнштейна и Дебая.
11. Ангармонизм колебаний атомов решетки. Тепловое расширение твердых тел.
12. Фонон-фононное рассеяние. Фононная теплопроводность.
13. Уравнение Шредингера для кристалла.
14. Адиабатическое и одноэлектронное приближения.
15. Волновая функция электрона в кристалле. Теорема Блоха.
16. Квазиимпульс электрона в кристалле. Скорость электрона.
17. Дискретность квазиимпульса. Закон изменения квазиимпульса.
18. Зоны Бриллюэна. Построение зон Бриллюэна для одно-, двух- и трехмерных решеток.
19. Дифракция электронной волны на границах зон Бриллюэна. Метод построения зон Бриллюэна.
20. Одномерное движение электрона в периодическом потенциале: модель Кронига-Пенни.
21. Приближенные методы решения одноэлектронного уравнения Шредингера.
22. Приближение почти свободных электронов (качественное рассмотрение, зонные схемы).
23. Метод Харрисона построения поверхностей Ферми металлов.
24. Метод сильной связи и его следствия.
25. Заполнение энергетических зон. Металлы, полупроводники и диэлектрики.
26. Эффективная масса электрона в кристалле.
27. Изоэнергетические поверхности вблизи экстремумов энергии. Классификация законов дисперсии. Неквадратичный закон дисперсии в методе сильной связи.
28. Движение электрона в постоянном электрическом поле. Дырки.
29. Перенормировка эффективной массы в результате взаимодействия электрона с решеткой. Полярон.
30. Плотность электронных состояний и ее зависимость от размерности кристалла.
31. Экситон. Метод эффективной массы.
32. Водородоподобная модель примеси.
33. Движение электрона в постоянном магнитном поле: траектории движения, открытые и замкнутые орбиты.
34. Циклотронная эффективная масса.
35. Квантование энергии электрона в магнитном поле. Уровни Ландау. Распределение электронов в пространстве квазиимпульсов.
36. Спиновое расщепление уровней Ландау.
37. Квантовые осцилляционные явления. Формула Лифшица-Онзагера.

Список вопросов к экзамену

по разделу «Физика полупроводников»

1. Классификация полупроводниковых материалов. Параметры зонной структуры полупроводников.

2. Зонная структура германия и кремния.
3. Зонная структура полупроводников A^3B^5 .
4. Зонная структура полупроводников A^2B^6 .
5. Зонная структура полупроводников A^4B^6 .
6. Локализованные состояния в полупроводниках. Водородоподобная модель примеси. Примесные зоны.
7. Мелкие, глубокие и резонансные уровни в энергетическом спектре полупроводников.
8. Функции распределения носителей заряда и плотности состояний в разрешенных зонах.
9. Вычисление концентраций свободных электронов и дырок. Интегралы Ферми.
10. Уравнение электронейтральности. Функции распределения носителей заряда по локализованным состояниям.
11. Статистика собственного полупроводника.
12. Определение ширины запрещенной зоны полупроводника по температурной зависимости собственной концентрации.
13. Статистика полупроводника с одним типом примеси (области примесной ионизации и истощения примеси).
14. Статистика полупроводника с одним типом примеси (области истощения примеси и собственной ионизации). Нижняя и верхняя температуры истощения.
15. Вырожденные примесные полупроводники.
16. Неравновесные носители заряда. Квазиуровни Ферми. Время жизни.
17. Основные механизмы генерации и рекомбинации носителей заряда. Максвелловское время релаксации.
18. Уравнение непрерывности и примеры его использования.
19. Межзонная рекомбинация носителей заряда (зависимости времени жизни от уровня инжекции и положения уровня Ферми).
20. Межзонная рекомбинация носителей заряда (теория Ван Русбрека-Шокли).
21. Диффузионный и дрейфовый токи. Соотношения Эйнштейна.
22. Диффузия и дрейф неосновных избыточных носителей заряда в примесном полупроводнике.
23. Полупроводник во внешнем электрическом поле. Дебаевская длина экранирования.
24. Работа выхода. Контакт металл-металл. Контактная разность потенциалов.
25. Контакт металл-полупроводник (энергетические диаграммы, уравнение Пуассона).
26. Выпрямляющие свойства барьера Шоттки.
27. Электронно-дырочный переход.
28. Выпрямляющие свойства p-n-перехода. ВАХ p-n-перехода.
29. Поверхностные состояния. Приповерхностный объемный заряд.
30. Поверхностная проводимость. Эффект поля.
31. Кинетические явления. Кинетическое уравнение Больцмана.
32. Механизмы рассеяния носителей заряда. Эффективное сечение рассеяния и его связь со временем релаксации. Рассеяние на атомах примеси, точечных дефектах и дислокациях.
33. Рассеяние на ионах примеси.
34. Рассеяние на акустических и оптических фононах.
35. Общее решение кинетического уравнения.
36. Вектора плотности тока и плотности потока энергии. Кинетические коэффициенты.
37. Классификация кинетических явлений. Термоэлектрические и термомагнитные эффекты.
38. Гальваномагнитные явления.
39. Электропроводность однодолинного и многодолинного полупроводников. Температурная зависимость подвижности.
40. Эффект Холла в полупроводнике с одним типом носителей заряда.
41. Эффект Холла в полупроводнике с двумя типами носителей заряда.
42. Эффект магнитосопротивления в неограниченном полупроводнике.
43. Эффект магнитосопротивления в ограниченном полупроводнике.
44. Теплопроводность. Число Лоренца.
45. Эффект Зеебека в полупроводнике с одним и двумя типами носителей заряда.

7. Ресурсное обеспечение:

7.1. Перечень основной и дополнительной литературы

Основная литература:

1. Ч. Киттель. Введение в физику твердого тела. Москва, Наука, 1978.
2. Дж. Блейкмор. Физика твердого тела. Москва, Мир, 1988.
3. Задачи по физике твердого тела. Под редакцией Г.Дж. Голдсмида. Москва, Наука, 1976.
4. К.В. Шалимова. Физика полупроводников. С.-Петербург, Лань, 2010.
5. П. Ю, М. Кардона. Основы физики полупроводников. Москва, Физматлит, 2002.
6. В.Л. Бонч-Бруевич, И.П. Звягин, И.В. Карпенко, А.Г. Миронов. Сборник задач по физике полупроводников. Москва, Наука, 1987.

Методические указания

1. Е.П. Скипетров. Введение в физику твердого тела. Учебно-методическое пособие. Москва, ВКНМ, 1996.
2. Е.П. Скипетров. Физика полупроводников. Учебно-методическое пособие. Москва, ВКНМ, 1997.

Дополнительная литература

1. М.И Каганов. Электроны, фононы, магноны. Москва, Наука, 1979.
2. М.И. Каганов, И.М. Лифшиц. Квазичастицы. Москва, Наука, 1989.
3. Дж. Займан. Принципы теории твердого тела. Москва, Мир, 1974.
4. Дж. Займан. Вычисление блоховских функций. Москва, Мир, 1973.
5. Н. Ашкрофт, Н. Мермин. Физика твердого тела. Москва, Мир, 1979.
6. И.М. Лифшиц, М.Я. Азбель, М.И. Каганов. Электронная теория металлов. Москва, Наука, 1971.
7. А.А. Абрикосов. Основы теории металлов. Москва, Наука, 1987.
9. Н.Б. Брандт, В.А. Кульбачинский. Квазичастицы в физике конденсированного состояния. Москва, Физматлит, 2005.
10. В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г.Калашников. Физика полупроводников. Москва, Наука, 1990.
11. П.С. Киреев. Физика полупроводников. Москва, Высшая школа, 1975.
12. Р. Смит. Полупроводники. Москва, Мир, 1982.
13. К. Зеегер. Физика полупроводников. Москва, Мир, 1977.
14. Г.Г. Зегря, В.И. Перель. Основы физики полупроводников. Москва, Физматлит, 2009.
15. М. Грундман. Основы физики полупроводников. Нанопизика и технические приложения. Москва, Физматлит, 2012.
16. И.М. Цидильковский. Зонная структура полупроводников. Москва, Наука, 1978.
17. Дж. Блекмор. Статистика электронов в полупроводниках. Москва, Мир, 1964.
18. С. Зи. Физика полупроводниковых приборов. Москва, Мир, 1984
19. Б.М. Аскеров. Электронные явления переноса в полупроводниках. Москва, Наука, 1985.

7.2. Перечень лицензионного программного обеспечения, в том числе отечественного производства (подлежит обновлению при необходимости)

Не требуется

7.3. Описание материально-технического обеспечения.

аудитория с доской, компьютерный проектор

8. Соответствие результатов обучения по данному элементу ОПОП результатам освоения ОПОП указано в Общей характеристике ОПОП.

9. Разработчик (разработчики) программы.

д.ф.-м.н., проф. Е.П. Скипетров, к.ф.-м.н. В.В. Ржевский