

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»
(ИОФ РАН)

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИОФ РАН,
И.А. Корр. РАН

С.В. Гарнов
_____ 202__ г.

Рабочая программа дисциплины
ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Специальность: 1.3.11 Физика полупроводников

г. Москва

2022 год

Рабочая программа дисциплины «Физика полупроводников» составлена в соответствии с Федеральными государственными требованиями к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре, условиям их реализации, срокам освоения этих программ с учетом различных форм обучения, образовательных технологий и особенностей отдельных категорий аспирантов, утвержденными приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 20 октября 2021 г. № 951.

Программу составили: Глушков В.В., д.ф.-м.н., доц., заместитель директора по научной работе.
Демишев С.В., д.ф.-м.н., проф., заместитель директора по научной работе.

Программа обсуждена и одобрена на заседании аспирантской комиссией ИОФ РАН
30.06.2022, протокол №2206-30

Программа утверждена решением Ученого совета ИОФ РАН 05.07.2022 протокол №13

Аннотация

Учебная дисциплина «Физика полупроводников» является важной составной частью Учебного плана программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре ИОФ РАН. В рамках дисциплины «Физика полупроводников» обучающиеся далее – аспиранты) получают базовые знания о современной физике полупроводников, включая основы зонной теории твердого тела, поведение носителей заряда во внешних полях, статистику электронов и дырок в полупроводниках, процессы рекомбинации неравновесных носителей заряда, явления в контактах, р-п переход, поверхностные явления. В курсе также затрагиваются некоторые вопросы физики полупроводниковых систем пониженной размерности, включая гетероструктуры и квантовые ямы, и физики неупорядоченных полупроводников.

Дисциплина «Физика полупроводников» является важным фактором формирования у аспиранта целостного научного мировоззрения, развития физического мышления, умения использовать базовые физические законы, включая законы квантовой физики, для анализа различных явлений в полупроводниковых материалах. Освоение дисциплины позволит выработать у аспирантов практические подходы к решению современных проблем в области физики полупроводников и смежных областях естественных наук. Дисциплина «Физика» также направлена на подготовку аспирантов к сдаче кандидатского экзамена по специальности 1.3.11 Физика полупроводников.

Общая трудоемкость учебной дисциплины «Физика полупроводников» составляет 5 зачетных единиц (180 часов).

Контроль уровня освоения дисциплины аспирантами проводится в формах текущей и итоговой аттестации. Текущая аттестация предполагает оценку знаний и умений на лекционных занятиях с помощью устных опросов, оценки различных видов самостоятельной работы аспирантов. Промежуточная аттестация аспирантов проводится в форме зачетов (в 3, 4 и 5 семестрах). Итоговая аттестация проводится в рамках кандидатского экзамена по специальности «Физика полупроводников» (6 семестр).

1. Цель изучения дисциплины

Цель изучения дисциплины состоит в освоении обучающимися (фундаментальных знаний в области физики полупроводников, овладении методами и выработке практических навыков решения задач по физике полупроводников, формировании умений, необходимых для успешного осуществления научно-исследовательской деятельности в области физики полупроводников.

2. Задачи дисциплины

1) освоение аспирантами базовых знаний в области физики полупроводников как дисциплины, интегрирующей общефизическую и общетеоретическую подготовку физиков и обеспечивающей научно-технические основы современных инновационных сфер деятельности;

2) обучение аспирантов основным принципам решения задач в области физики полупроводников и освоение основных теоретических методов, применимых к описанию явлений в этой области физики;

3) формирование правильных теоретических подходов к выполнению научных исследований в области физики полупроводников.

3. Место дисциплины в структуре программы аспирантуры

Дисциплина «Физика полупроводников» относится к элективным дисциплинам Образовательного компонента «Дисциплины (модули)» программы аспирантуры по специальности 1.3.11 Физика полупроводников.

Дисциплина «Физика полупроводников» реализуется в соответствии с ФГТ, ОПОП ВО и Учебного плана аспирантуры ИОФ РАН по специальности 1.3.11 Физика полупроводников.

Изучение дисциплины «Физика полупроводников» опирается на знания базовых разделов математического анализа, дифференциальных уравнений, общей физики, квантовой механики, а также начальных знаний по теоретической физике, приобретенных аспирантами в рамках освоения программ магистратуры или специалитета по естественнонаучным и техническим специальностям.

4. Требования к результатам освоения дисциплины

Изучение дисциплины «Физика полупроводников» направлено на формирование у аспирантов следующих когнитивных умений и навыков:

- способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач в области физики полупроводников, а также в смежных и междисциплинарных областях;
- способность проектировать и осуществлять комплексные исследования, в том числе междисциплинарные, на основе целостного системного научного мировоззрения с использованием знаний в области физики полупроводников.

В результате изучения дисциплины аспирант должен:

Знать:

- место и роль общих вопросов науки в научных исследованиях; естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности в областях;
- современные проблемы физики и математики;
- взаимосвязи и фундаментальное единство естественных наук;
- основные законы, явления и эффекты в физике полупроводников;
- теоретические модели фундаментальных процессов и явлений в физике полупроводников и ее приложениях;
- новейшие открытия естествознания в области физики полупроводников;
- постановку проблем моделирования физических процессов, протекающих в полупроводниках;
- основные разделы физики полупроводников: кристаллографию и физику кристаллической решетки, поведение носителей заряда во внешних полях, статистику электронов и дырок в полупроводниках, процессы рекомбинации неравновесных носителей заряда, явления в контактах, р-п переход, поверхностные явления в полупроводниках;
- основные физические свойства неупорядоченных полупроводников.

Уметь:

- эффективно использовать на практике теоретические компоненты науки: понятия, суждения, умозаключения, законы, а также фундаментальные знания для понимания сущностных явлений окружающего мира;
- представить панораму универсальных методов и законов современного естествознания;
- решать практические задачи по экспериментальным и теоретическим исследованиям в области физики полупроводников;
- обосновывать применение математических и физических моделей исследуемых процессов, явлений и объектов, относящихся к физике полупроводников;
- работать с информацией в области физики полупроводников, полученной из различных источников: научной периодической литературы, монографий и учебников, электронных ресурсов сети Интернет;
- активно и целенаправленно применять полученные знания, навыки и умения для выбора тематики выполнения индивидуальной научно-исследовательской работы, планирования оптимального проведения эксперимента в области физики полупроводников;

- абстрагироваться от несущественных влияний при моделировании реальных физических ситуаций в физике полупроводников;
- выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности при анализе электронных и электронно-оптических свойств полупроводников и полупроводниковых наноструктур, объектов кристаллофизики, физического материаловедения;
- привлекать для решения освоенный физико-математический аппарат теоретической физики твердого тела, квантово-химического моделирования строения и свойств твердых тел и наноструктур;
- применять на практике умения и навыки в организации исследовательских работ и проводить научные исследования, готовность к участию в инновационной деятельности.

Владеть:

- планированием, постановкой и обработкой результатов физического эксперимента в области физики полупроводников;
- математическим моделированием физических задач в физике полупроводников.
- научной картиной мира в физике полупроводников и смежных областях естествознания;
- творческим подходом в реализации научно-технических задач, основанному на систематическом обновлении полученных знаний, навыков и умений и использовании последних достижений в области физики полупроводников.

5. Объем и вид учебной работы

Общая трудоёмкость дисциплины «Физика полупроводников» составляет 5 зач. ед. (180 часов), их распределение по видам работ представлено в таблице 1.

Таблица 1

Распределение трудоёмкости дисциплины по видам работ

Вид учебной работы	Трудоёмкость					
	зач. ед.	час.	в т.ч. по семестрам			
			3	4	5	6
Общая трудоёмкость дисциплины по учебному плану	5	180	54	54	36	36
Аудиторная работа:	2	72	36	36	-	-
лекции (Л)		72	36	36	-	-
семинары (С)		-	-	-	-	-
Самостоятельная работа:	3	108	18	18	32	36
самоподготовка (проработка и повторение лекционного материала, освоение материала учебников и учебных пособий, подготовка к семинарам и т.д.)		56	14	14	32	-
Подготовка к зачёту		16	4	4	4	-
Подготовка к экзамену		36	-	-	-	36
Вид контроля (З – зачет, Э – кандидатский экзамен)			3	3	3	Э

6. Содержание дисциплины

Таблица 2

Тематический план учебной дисциплины

Наименование разделов и тем дисциплины	Всего	Аудиторная работа		Внеаудиторная работа СР
		Л	С	
Раздел 1. Кинетические явления в кристаллах				
Тема 1.1. Зонный спектр кристаллов	12	8	0	4
Тема 1.2. Квазичастицы	12	8	0	4
Тема 1.3. Носители заряда в магнитном поле	15	10	0	5
Тема 1.4. Кинетическое уравнение Больцмана	15	10	0	5
Всего за 3 семестр	54	36	0	18
Раздел 2. Кинетические явления в неупорядоченных средах				
Тема 2.1. Теория протекания	12	8	0	4
Тема 2.2. Прыжковая проводимость	15	10	0	5
Тема 2.3. Переход металл-изолятор	5	4	0	1
Раздел 3. Контактные и поверхностные явления в полупроводниках				
Тема 3.1. Контактные явления в полупроводниках	6	4	0	2
Тема 3.2. Поверхностные свойства полупроводников	8	6	0	2
Тема 3.3. Полупроводниковые структуры пониженной размерности и сверхрешетки.	8	4	0	4
Всего за 4 семестр	54	36	0	18
Раздел 4. Вопросы для самостоятельного изучения дисциплины	36	0	0	36
Всего за 5 семестр	36	0	0	36
Раздел 5. Вопросы для самостоятельного изучения дисциплины по программе кандидатского экзамена по специальности	36	0	0	36
Всего за 6 семестр	36	0	0	36
Итого по дисциплине	180	72	0	108

Раздел 1. Кинетические явления в кристаллах

Тема 1.1. Зонный спектр кристаллов

Многочастичное уравнение Шредингера для кристалла. Приближение Борна-Оппенгеймера. Одноэлектронное приближение. Уравнение Хартри и уравнение Хартри-Фока. Зонный спектр. Периодическое пространство. Квазиимпульс, зона Бриллюэна. Теорема Блоха. Закон дисперсии и эффективная масса. Методы расчетов зонного спектра метод псевдопотенциала, k - p – метод. Тензор эффективной массы, роль симметричных точек в зоне Бриллюэна.

Зонный спектр одномерного уравнения Шредингера с периодическим потенциалом. Операторы координаты и скорости для электронов в кристалле. Закон

изменения квазиимпульса. Метод эффективной массы. «Искривление» зон во внешнем поле. Динамика электрона в случае однородного электрического поля. Решение задачи о водородоподобной примеси.

Тема 1.2. Квазичастицы

Квазичастицы. Определение, введение квазичастиц на примере идеального Ферми-газа. Поверхность Ферми. Полное число состояний в зоне Бриллюэна. Функции распределения квазичастиц и частиц, химпотенциал. Электроны и дырки в полупроводниках.

Модель Ферми-газа. Плотность состояний, особенности Ван-Хова. Эффективная масса плотности состояний. Интегралы Зоммерфельда. Температурная зависимость химпотенциала, температура вырождения. Электронная теплоемкость. Квазичастицы в идеальном Бозе-газе. Функции распределения и химпотенциал. Бозе-конденсация. Температура конденсации.

Колебания кристаллической решетки. Динамические уравнения, свойства силовой функции. Закон дисперсии. Акустические и оптические колебания. Переход к квантовому описанию. Фононы, функция распределения. Фононная теплоемкость.

Тема 1.3. Движение в магнитном поле

Движение электронов в кристалле во внешнем магнитном поле. Траектории и циклотронная масса. Квазиклассическое квантование движения в магнитном поле. Уровни Ландау. Плотность состояний. Роль экстремальных сечений поверхности Ферми. Цилиндр Ландау.

Квантовые осцилляционные явления. Эффекты де Гааза-ван Альфена и Шубникова-де Гааза. Период квантовых осцилляций по обратному полю. Движение химпотенциала в магнитном поле. Спиновое расщепление. Амплитуда осцилляций. Формула Лифшица-Косевича, температура Дингла. Использование квантовых осцилляционных эффектов для исследования поверхности Ферми.

Тема 1.4. Кинетическое уравнение Больцмана

Модель Друде: проводимость, эффект Холла, магнитосопротивление и циклотронный резонанс. Кинетическое уравнение Больцмана. Выражение для тока и потока энергии. Теорема Лиувилля. Приближение времени релаксации. Время релаксации для основных механизмов рассеяния в твердых телах (ионы примеси, колебания решетки, вакансии и точечные дефекты, дислокации, границы кристаллитов, межэлектронное рассеяние). Задача о рассеянии электрона на ионизированной примеси. Формула Конуэлл-Вайскопфа.

Решение кинетического уравнения Больцмана в вырожденном случае. Проводимость, частотная зависимость проводимости. Движение в магнитном поле, тензор проводимости и эффект Холла. Сравнение с моделью Друде.

Общее решение кинетического уравнения Больцмана в приближении времени релаксации. Продольные и поперечные эффекты. Кинетические коэффициенты. Случай изотропной и анизотропной эффективной массы. Расчет проводимости с помощью кинетического уравнения Больцмана. Температурная зависимость дрейфовой подвижности в случае рассеяния на акустических фононах и ионах примеси. Случай многодолинной изоэнергетической поверхности. Транспортная эффективная масса. Случай нескольких групп носителей заряда. Сравнение с моделью Друде.

Раздел 2. Кинетические явления в неупорядоченных средах

Тема 2.1. Теория протекания

Теория протекания. Задача узлов на упорядоченных решетках. Кластеры. Порог протекания. Задачи на конечных решетках. Задачи на бесконечных решетках. Бесконечный кластер. Инвариант задачи узлов. Черное и белое протекание. Структура бесконечного кластера (на примере задачи узлов). Модель Шкловского-де Женна. Радиус корреляции, критическое поведение, физический смысл для $x > x_c$ и $x < x_c$. Функция $P(x)$ для вероятности принадлежности к бесконечному кластеру. Задача связей и ее инвариант. Решетка Бете. Точное решение для $P(x)$ и x_c на решетке Бете. Континуальные задачи. Инвариант континуальной задачи. Задачи на случайных узлах. Задача сфер, критерий связности. Инварианты задачи сфер.

Кинетические свойства гетерогенных сред. Проводимость для случая малой концентрации включений. Металлические включения в диэлектрической матрице. Идеально проводящие (сверхпроводящие) включения в диэлектрической матрице. Эффект формы включений. Критическое поведение проводимости в окрестности порога протекания для металлических и сверхпроводящих включений. Интерполяционные формулы

Тема 2.2. Прыжковая проводимость

Постановка задачи о проводимости по локализованным состояниям. Прыжковая проводимость. Сетка сопротивлений Миллера-Абрахамса. Метод решения задачи о прыжковой проводимости, основанный на теории протекания. Закон Мотта. Прыжковая проводимость с переменной длиной прыжка, оптимальные прыжки. Влияние особенностей в плотности состояний на прыжковую проводимость. Суперлокализация волновой функции. Решение задачи о прыжковой проводимости по Мотту. Проводимость на постоянном и переменном токе. Оптимальные прыжки.

Проблема корреляций. Короткодействующие (хаббардовские) корреляции. D^- - состояния. Влияние хаббардовских корреляций на прыжковую проводимость. Дальнодействующие (кулоновские) корреляции. Кулоновская щель. Элементарные возбуждения в модели кулоновской щели. Кулоновская щель и прыжковая проводимость. Экранировка в модели кулоновской щели.

Тема 2.3. Переход металл-изолятор

Переход металл-изолятор. Случайный потенциал, порог подвижности Ферми-стекло. Локализованные и делокализованные состояния. Теорема Андерсона. Модели Андерсона и Мотта. Переход металл-изолятор в легированном полупроводнике. Критерий Мотта. Скейлинг. Проблема описания перехода металл-изолятор, порог подвижности как особая точка. Модель Андерсона, безразмерная проводимость как мера беспорядка.

Раздел 3. Контактные и поверхностные явления в полупроводниках

Тема 3.1. Контактные явления в полупроводниках.

Схема энергетических зон в контакте металл-полупроводник. Обогащенные, обедненные и инверсионные слои пространственного заряда вблизи контакта. Вольтамперная характеристика барьера Шоттки. Энергетическая диаграмма p-n перехода. Инжекция неосновных носителей заряда в p-n переходе. Гетеропереходы. Энергетические диаграммы гетеропереходов.

Тема 3.2. Поверхностные свойства полупроводников.

Поверхностные состояния и поверхностные зоны. Искривление зон, распределение заряда и потенциала вблизи поверхности. Поверхностная рекомбинация. Эффект поля. Таммовские уровни. Скорость поверхностной рекомбинации.

Тема 3.3. Полупроводниковые структуры пониженной размерности и сверхрешетки.

Размерное квантование. Двумерные и квазидвумерные электронные системы и структуры. Квантовые ямы. Квантовые нити. Квантовые точки. Энергетический спектр электронов и плотность состояний в этих системах. Оптические явления в структурах с квантовыми ямами, правила отбора для межзонных и внутризонных (межподзонных) переходов. Межзонное поглощение и излучательная рекомбинация в этих структурах. Экситоны в квантовых ямах, квантово-размерный эффект Штарка. Электрические и гальваномагнитные явления в двумерных структурах. Эффект Шубникова-де Гааза. Общее представление о квантовом эффекте Холла.

Раздел 4. Вопросы для самостоятельного изучения дисциплины

Разделы, рекомендуемые для самостоятельного изучения:

(приводятся разделы, возможен перенос специальных вопросов из основной программы или программы кандидатского экзамена)

4.1. Основы технологии полупроводников и методы определения их параметров

Методы выращивания объемных монокристаллов из жидкой и газовой фаз. Методы выращивания эпитаксиальных пленок (эпитаксия из жидкой и газовой фазы). Молекулярно-лучевая эпитаксия. Металлорганическая эпитаксия. Методы легирования полупроводников. Основные методы определения параметров полупроводников: ширины запрещенной зоны, подвижности и концентрации свободных носителей, времени жизни неосновных носителей, концентрации и глубины залегания уровней примесей и дефектов.

4.2. Химическая связь и атомная структура полупроводников

Электронная конфигурация внешних оболочек атомов и типы сил связи в твердых телах. Ван-дер-ваальсова, ионная и ковалентная связь. Структуры важнейших полупроводников – элементов AIV, AVI и соединений типов AIIIBV, AIIIVI, AIVBVI. Примеси и структурные дефекты в кристаллических и аморфных полупроводниках. Химическая природа и электронные свойства примесей. Точечные, линейные и двумерные дефекты.

4.3. Дифракция в кристаллах

Распространение волн в кристаллах. Дифракция рентгеновских лучей, нейтронов и электронов в кристалле. Упругое и неупругое, когерентное и некогерентное рассеяние нейтронов, их особенности.

4.4. Магнитные свойства твердых тел

Парамагнетизм и диамагнетизм локализованных магнитных моментов. Закон Кюри. Парамагнетизм и диамагнетизм электронов проводимости. Природа ферромагнетизма. Фазовый переход в ферромагнитное состояние. Обменное взаимодействие, его виды. Закон Кюри – Вейсса. Ферромагнитные домены. Доменные границы (Блоха, Нееля). Типы магнитного упорядочения (антиферромагнетики, ферримагнетики, гелимагнетики, киральные магнетики), магнитная структура. Точка Нееля. Восприимчивость антиферромагнетиков. Спиновые волны, магноны. Движение магнитного момента в постоянном и переменном магнитных полях. Электронный парамагнитный резонанс. Ядерный магнитный резонанс.

4.5. Оптические свойства полупроводников

Комплексная диэлектрическая проницаемость и оптические постоянные. Коэффициенты поглощения и отражения. Соотношения Крамерса-Кронига. Поглощение

электромагнитного излучения в металлах. Плазменная частота. Поглощение света в полупроводниках (межзонное, примесное поглощение, поглощение свободными носителями, решеткой). Определение основных характеристик полупроводника из оптических исследований. Магнитооптические эффекты (эффекты Фарадея, Фохта, и Керра).

4.6. Сильно коррелированные электронные системы

Примесные ионы с d- и f-электронами в металлах. Эффект Кондо. Резонанс Абрикосова-Сула. Тяжелые фермионы, электронная теплоемкость и восприимчивость в тяжелофермионных системах. Соединения с промежуточной валентностью, кондовские изоляторы. Квантовые критические явления, квантовые фазовые переходы, роль беспорядка. Топологические изоляторы.

Дополнительный перечень вопросов для самостоятельного изучения дисциплины «Физика полупроводников» формируется научным руководителем аспиранта и утверждается аспирантской комиссией.

Раздел 5. Вопросы для самостоятельного изучения дисциплины по программе кандидатского экзамена по специальности

Перечень вопросов для самостоятельного изучения дисциплины «Физика полупроводников» при подготовке к кандидатскому экзамену по специальности соответствует программе кандидатского экзамена по специальности «Физика полупроводников», утвержденной Ученым советом ИОФ РАН (протокол №__ от «__»_____ 20__ г.).

7. Примерная тематика:

7.1. Курсовых работ

Не предусмотрено учебным планом

7.2. Научно-исследовательских работ и проектов

Не предусмотрено учебным планом

7.3. Рефератов

Не предусмотрено учебным планом

8. Ресурсное обеспечение.

8.1. Кадровый потенциал

Аспирантура ИОФ РАН располагает кадровыми ресурсами, гарантирующими качество подготовки аспиранта по специальности 1.3.11 Физика полупроводников в соответствии с ФГТ.

8.2. Материально-техническое оснащение.

Для проведения занятий по дисциплине «Физика полупроводников», предусмотренной учебным планом подготовки аспирантов, имеется необходимая материально-техническая база, соответствующая действующим санитарным и противопожарным правилам и нормам, обеспечивающая проведение всех видов теоретической и практической подготовки:

- аудитории для лекционных и семинарских занятий, оснащенные презентационным оборудованием (ноутбук, проектор, экран) и маркерными досками;
- оборудование для проведения лекционных и семинарских занятий в дистанционном формате (в случае необходимости);
- лицензионное программное обеспечение для демонстрации презентаций в формате PowerPoint, OpenOffice или Portable Document Format.

– учебная литература и методические материалы для проведения самостоятельной работы по дисциплине.

8.3. Образовательные технологии

При реализации различных видов учебной работы (лекции, семинары, самостоятельная работа) используются следующие современные образовательные технологии:

- лекционная система обучения;
- информационно-коммуникационные технологии;
- исследовательские методы в обучении.

Программа дисциплины «Физика полупроводников» предусматривает широкое использование в учебном процессе активных и интерактивных форм проведения занятий в сочетании с внеаудиторной самостоятельной работой с целью формирования и развития профессиональных навыков у обучающихся. Эффективность применения интерактивных форм обучения обеспечивается реализацией следующих условий:

- создание диалогического пространства в организации учебного процесса;
- использование принципов социально-психологического обучения в учебной и научной деятельности;
- применение интерактивных форм обучения, направленных на развитие внутренней активности аспиранта, стимулирование мотивации и интереса в области углубленного изучения физики полупроводников в общеобразовательном и профессиональном плане; повышение уровня активности и самостоятельности научно-исследовательской работы; развитие навыков анализа, критичности мышления, научной коммуникации.

Образовательные технологии предполагают проведение занятий в форме лекций с объяснением теоретического материала, семинаров с разбором лекционного материала и решением задач и самостоятельную работу. Самостоятельная работа аспирантов проводится в форме изучения отдельных теоретических вопросов по предлагаемой литературе и самостоятельного решения задач с дальнейшим их разбором или обсуждением на аудиторных занятиях.

На занятиях может использоваться промежуточный контроль в виде решения задач по лекционному и семинарскому материалу.

9. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

9.1. Основная литература

9.1.1. Электронные учебные издания (учебники, учебные пособия).

9.1.2. Электронные базы данных, к которым обеспечен доступ.

- Интернет-ресурсы научно-технической библиотеки ИОФ РАН
<https://www.gpi.ru/about/library/education/>
- Научная электронная библиотека elibrary.ru;
- Электронные базы Web of Science и SCOPUS;
- Журналы по физике конденсированного состояния и наноматериалам (Физика твердого тела, ЖЭТФ, Письма в ЖЭТФ, Успехи физических наук, Nanoletters, Physica Status Solidi b, Physical Review B и др.);
- Научные и научно-технические журналы издательств American Physical Society, American Institute of Physics, Institute of Physics, Nature, Springer Verlag, база данных Web of Science.

9.1.3. Учебники

1. Брандт Н.Б., Кульбачинский В.А., Квазичастицы в физике конденсированного состояния. М.: Физматлит, 2007 г., 632 с.
2. Киреев П.С., Физика полупроводников. М.: Высшая Школа, 1975, 584 с.

3. И.А.Квасников. М.: Термодинамика и статистическая физика (в 3-х томах). Едиториал УРСС, 2002.
4. В.Ф.Гантмахер. Электроны в неупорядоченных средах. М.: Физматлит, 2003

9.1.4. Учебные пособия

1. С.В.Демишев, А.А.Пронин. ФТТ, в. 7 (2006)

9.2. Дополнительная литература

1. Киттель Ч., Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978, 792 с.
2. Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твердого тела, тт. I и II. М., Мир, 1979.
3. Займан Дж. Принципы теории твердого тела. М: Мир, 1974.
4. Вонсовский С.В. Магнетизм. М., Наука, 1971.
5. В.В.Шмидт «Введение в физику сверхпроводимости». МЦ НМО, Москва, 2000.
6. Косевич А.М. Основы механики кристаллической решетки. М.: Наука, 1972
7. Шкловский Б.И., Эфрос А.Л. Электронные свойства легированных полупроводников. М.: Наука, 1979 г.
8. Эфрос А.Л. Физика и геометрия беспорядка. М.: Наука, 1982
9. Звягин И.П. Кинетические явления в неупорядоченных полупроводниках. М.: МГУ, 1984
10. Мотт Н., Дэвис Э. Электронные процессы в некристаллических веществах, т.1 и т.2. М.: Мир, 1982
11. Бонч-Бруевич В.Л., Звягин И.П., Кайпер Р., Миронов А.Г., Эндерлайн Р., Эссер Б. Электронная теория неупорядоченных полупроводников. М.: Наука, 1981
12. Займан Дж. Модели беспорядка. М.: Мир, 1982
13. Шенберг Д. Магнитные осцилляции в металлах. М.: Мир, 1986
14. С.В.Демишев, Ю.В.Косичкин, Н.Е.Случанко, А.Г.Ляпин “Аморфные полупроводники, синтезированные закалкой под давлением”. УФН, **164**, №2 (1994)
15. Б.Л.Альтшулер, А.Г.Аронов, А.И.Ларкин, Д.Е.Хмельницкий. ЖЭТФ, **81**, в.2(8) (1981) 768

9.2.1. Учебно-методические пособия (учебные задания)

нет

9.2.2. Литература для углубленного изучения, подготовки рефератов

нет

10. Аттестация по дисциплине. Форма промежуточной аттестации по итогам обучения в 3, 4 и 5 семестрах – зачет, процедура аттестации в 3 и 4 семестрах включает решение контрольных задач и ответ на вопросы, в 5 семестре – ответ на вопросы.

Итоговая аттестация по дисциплине включает сдачу кандидатского экзамена экзаменационной комиссии, утвержденной локальным нормативным актом ИОФ РАН.

11. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины

11.1 Оценочные средства текущего контроля успеваемости и сформированности компетенций

Для текущего контроля успеваемости применяется комплекс методик и диагностического инструментария: устный опрос, решение домашних задач по теме занятий, учет посещаемости занятий и активности аспирантов в ходе занятий.

11.2 Примерный перечень вопросов к зачету по дисциплине

1. Многочастичное уравнение Шредингера для кристалла. Приближение Борна-Оппенгеймера.
2. Зонный спектр. Квазиимпульс, зона Бриллюэна. Теорема Блоха. Закон дисперсии и эффективная масса.
3. Методы расчетов зонного спектра метод псевдопотенциала, k - p – метод. Тензор эффективной массы, роль симметричных точек в зоне Бриллюэна.
4. Зонный спектр одномерного уравнения Шредингера с периодическим потенциалом.
5. Операторы координаты и скорости для электронов в кристалле. Закон изменения квазиимпульса.
6. Метод эффективной массы. Динамика электрона в случае однородного электрического поля.
7. Квазичастицы. Определение, введение квазичастиц на примере идеального Ферми-газа. Поверхность Ферми. Функции распределения квазичастиц и частиц, химпотенциал
8. Модель Ферми-газа. Плотность состояний, особенности Ван-Хова. Эффективная масса плотности состояний. Электронная теплоемкость.
9. Квазичастицы в идеальном Бозе-газе. Функции распределения и химпотенциал. Бозе-конденсация. Температура конденсации.
10. Колебания кристаллической решетки. Динамические уравнения, свойства силовой функции. Закон дисперсии. Акустические и оптические колебания.
11. Переход к квантовому описанию. Фононы, функция распределения. Фононная теплоемкость.
12. Движение электронов в кристалле во внешнем магнитном поле. Траектории и циклотронная масса.
13. Квазиклассическое квантование движения в магнитном поле. Уровни Ландау. Плотность состояний. Роль экстремальных сечений поверхности Ферми. Цилиндр Ландау.
14. Модель Друде: проводимость, эффект Холла, магнитосопротивление и циклотронный резонанс.
15. Кинетическое уравнение Больцмана. Приближение времени релаксации. Время релаксации для основных механизмов рассеяния в твердых телах (ионы примеси, колебания решетки, вакансии и точечные дефекты, дислокации, границы кристаллитов, межэлектронное рассеяние).
16. Задача о рассеянии электрона на ионизованной примеси. Формула Конуэлл-Вайскопфа.
17. Решение кинетического уравнения Больцмана в вырожденном случае. Проводимость, частотная зависимость проводимости. Движение в магнитном поле, тензор проводимости и эффект Холла. Сравнение с моделью Друде.
18. Общее решение кинетического уравнения Больцмана в приближении времени релаксации. Продольные и поперечные эффекты. Кинетические коэффициенты. Случаи изотропной и анизотропной эффективной массы.
19. Расчет проводимости с помощью кинетического уравнения Больцмана. Температурная зависимость дрейфовой подвижности в случае рассеяния на акустических фононах и ионах примеси. Транспортная эффективная масса. Случай нескольких групп носителей заряда. Сравнение с моделью Друде.
20. Теория протекания. Задача узлов на упорядоченных решетках. Кластеры. Порог протекания. Задачи на конечных решетках. Задачи на бесконечных решетках. Бесконечный кластер. Структура бесконечного кластера (на примере задачи узлов). Модель Шкловского-де Женна. Радиус корреляции, критическое поведение, физический смысл для $x > x_c$ и $x < x_c$.

21. Кинетические свойства гетерогенных сред. Проводимость для случая малой концентрации включений. Металлические включения в диэлектрической матрице. Идеально проводящие (сверхпроводящие) включения в диэлектрической матрице. Эффект формы включений.

22. Постановка задачи о проводимости по локализованным состояниям. Прыжковая проводимость. Сетка сопротивлений Миллера-Абрахамса. Метод решения задачи о прыжковой проводимости, основанный на теории протекания. Закон Мотта. Прыжковая проводимость с переменной длиной прыжка, оптимальные прыжки.

23. Решение задачи о прыжковой проводимости по Мотту. Проводимость на постоянном и переменном токе. Оптимальные прыжки.

24. Проблема корреляций. Короткодействующие (хаббардовские) корреляции. D- -состояния. Влияние хаббардовских корреляций на прыжковую проводимость. Дальнодействующие (кулоновские) корреляции. Кулоновская щель.

25. Переход металл-изолятор. Случайный потенциал, порог подвижности Ферми-стекло. Локализованные и делокализованные состояния. Модели Андерсона и Мотта. Переход металл-изолятор в легированном полупроводнике. Критерий Мотта.

26. Описание гальваномагнитных эффектов с помощью кинетического уравнения Больцмана. Эффект Холла. Угол Холла, холловская подвижность, коэффициент Холла. Расчет эффекта Холла с помощью кинетического уравнения Больцмана. Случай слабого и сильного поля. Случай нескольких групп носителей заряда. Сравнение с моделью Друде.

27. Магнитосопротивление. Коэффициент магнитосопротивления. Расчет поперечного магнитосопротивления с помощью кинетического уравнения Больцмана. Случай слабого и сильного поля. Насыщение магнитосопротивления. Роль поля Холла. Магнитосопротивление в образце конечных и бесконечных размеров.

28. Схема энергетических зон в контакте металл-полупроводник. Обогащенные, обедненные и инверсионные слои пространственного заряда вблизи контакта.

29. Инжекция неосновных носителей заряда в p-n переходе. Гетеропереходы. Энергетические диаграммы гетеропереходов.

30. Поверхностные состояния и поверхностные зоны. Искривление зон, распределение заряда и потенциала вблизи поверхности. Эффект поля.

31. Размерное квантование. Двумерные и квазидвумерные электронные системы и структуры. Квантовые ямы. Квантовые нити. Квантовые точки. Энергетический спектр электронов и плотность состояний в этих системах.

32. Оптические явления в структурах с квантовыми ямами, правила отбора для межзонных и внутризонных (межподзонных) переходов. Межзонное поглощение и излучательная рекомбинация в этих структурах. Экситоны в квантовых ямах.

11.3 Примерный перечень задач к зачету по дисциплине

1. В единичном объеме кристалла содержится N невзаимодействующих дефектов, каждый из которых может находиться в двух энергетических состояниях E_1 и E_2 , причем $E_2 - E_1 = D > 0$. Найти вклад в теплоемкость кристалла, обусловленный такими дефектами. В какой области температур следует ожидать максимального вклада в теплоемкость, связанного с дефектами?

2. Электроны в кристалле, находящиеся в точке G зоны Бриллюэна исследуются методом циклотронного резонанса (ЦР). Эксперименты по ЦР показали, что для частоты электромагнитного излучения 150 ГГц в магнитном поле 8 Тл наблюдается циклотронный резонанс. Чему равна эффективная циклотронная масса? Ответ представить в единицах массы свободного электрона.

3. В полуметалле концентрация электронов составляет $n = 10^{18} \text{ см}^{-3}$, а эффективное время релаксации равно $\tau^* = 2 \cdot 10^{-13} \text{ с}$. Считая поверхность Ферми сферой, оценить

фермиевский импульс p_F , энергию Ферми E_F , удельное сопротивление ρ на постоянном токе, и эффективную длину свободного пробега l_F . Ответ для E_F , ρ и l_F представить в единицах эВ, мкОм·см и Å соответственно. Для какой частоты действительная часть проводимости уменьшится в два раза?

12. Методические рекомендации аспирантам по освоению дисциплины

Аспиранты должны быть заранее ознакомлены с графиком учебного процесса, содержанием дисциплины и методикой проведения занятий. Посещаемость учебных занятий является обязательной для обучающихся, как и ведение конспектов, записей. Отработка пропущенных занятий предполагает самостоятельную работу аспиранта с учебной литературой и осуществляется в форме собеседования по теме пропущенного занятия.

13. Методические рекомендации преподавателям по организации обучения по дисциплине

13.1 Порядок проведения лекции

Вводная часть включает формулировку темы лекции с краткой аннотацией предлагаемых для изучения вопросов, характеристику места и значения данной темы в курсе.

Основная часть лекции имеет своей целью раскрытие содержания основных вопросов и определяется логической структурой плана лекции.

В *заключительной части* лектор проводит обобщение наиболее важных и существенных вопросов, делает выводы, отвечает на вопросы слушателей, формулирует задачи для самостоятельной работы аспирантов и рекомендует соответствующую литературу.

13.2 Порядок проведения семинара

Во вводной части решаются организационные задачи семинарского занятия: проверка готовности аудитории и подготовленности аспирантов к занятию, формулировка темы, цели и задач занятия.

Основная часть занятия предполагает организацию дискуссии: постановку проблемы, выделение основных направлений. Выступление докладчиков, раскрывающих основные положения по вопросу. Выступления оппонентов, раскрывающих свое видение проблемы, дискуссия по докладу.

В заключительной части подводятся итоги занятия, дается оценка результатов работы аспирантов.

13.3 Организация самостоятельной работы аспирантов

Основными формами самостоятельной работы и контроля аспирантов являются:

Выполнение индивидуальных заданий (как репродуктивного, так и творческого характера), позволяющих диагностировать уровень сформированности у аспирантов знаний, умений и навыков по дисциплине.

Собеседование – форма учебной деятельности, специальная беседа преподавателя с аспирантом, рассчитанная на выяснение объема знаний аспиранта по определенному разделу, теме, проблеме и т.п., позволяющая оценить их умение аргументировать собственную точку зрения, предполагающее всестороннее обсуждение какого-либо вопроса, проблемы или сопоставлении информации, идей, мнений, предложений.

14. Описание критериев оценивания знаний обучаемых, шкал их оценивания

14.1. Критерии оценивания знаний обучаемых на зачете по дисциплине:

Оценка «Зачтено»: Обучающийся обнаружил знание основного учебно-программного материала в объеме, необходимом для дальнейшей учебы и предстоящей

работы по специальности, справился с выполнением заданий и контрольных работ, предусмотренных программой дисциплины.

Оценка «Не зачтено»: Обучающийся обнаружил значительные пробелы в знаниях основного учебно-программного материала, допустил принципиальные ошибки в выполнении предусмотренных программой заданий и не способен продолжить обучение или приступить по окончании аспирантуры к профессиональной деятельности без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине.

14.2. Критерии оценивания знаний обучаемых на кандидатском экзамене по специальности:

Оценка ставится по каждому из вопросов кандидатского экзамена по специальности, оценка за экзамен определяется как среднее арифметическое из оценок по трем вопросам экзамена с соответствующим округлением до целочисленной по правилам арифметических операций. При наличии оценки «неудовлетворительно» по одному из вопросов ставится общая оценка «неудовлетворительно».

Оценка «Отлично»: В ответе качественно раскрыто содержание темы. Ответ хорошо структурирован. Прекрасно освоен понятийный аппарат. Продемонстрирован высокий уровень понимания материала. Продемонстрировано превосходное умение формулировать свои мысли, обсуждать дискуссионные положения. Представлены полные ответы на дополнительные вопросы по теме.

Оценка «Хорошо»: Основные вопросы темы раскрыты. Структура ответа в целом адекватна теме. Хорошо освоен понятийный аппарат. Продемонстрирован хороший уровень понимания материала. Продемонстрировано хорошее умение формулировать свои мысли, обсуждать дискуссионные положения. Представлены частичные ответы на дополнительные вопросы по теме.

Оценка «Удовлетворительно»: Тема раскрыта частично. Ответ структурирован недостаточно. Понятийный аппарат освоен частично. Продемонстрировано понимание отдельных положений из материала по теме. Продемонстрированы удовлетворительное умение формулировать свои мысли, обсуждать дискуссионные положения. Представлены фрагментарные ответы на дополнительные вопросы по теме.

Оценка «Неудовлетворительно»: Тема не раскрыта. Ответ не структурирован. Понятийный аппарат освоен в недостаточном объеме. Понимание материала фрагментарное или отсутствует. Продемонстрировано неумение формулировать свои мысли, обсуждать дискуссионные положения. Не представлены ответы на дополнительные вопросы по теме.

Программу разработали:

Глушков В.В., д.ф.-м.н., доцент

(подпись)

Демишев С.В., д.ф.-м.н., профессор

(подпись)