

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова

Физический факультет

УТВЕРЖДАЮ

Декан физического факультета



(подпись)

И.С. Огнев

19 сентября 2023 года

**Программа вступительного экзамена в аспирантуру
по научной специальности
1.3.11 «Физика полупроводников»**

Ярославль 2023

ОБЩИЙ РАЗДЕЛ. Избранные вопросы общей физики

1. Механика

Инерциальные системы отсчета и законы динамики Ньютона. Потенциальная и кинетическая энергия. Закон сохранения энергии. Свободные и вынужденные колебания. Резонанс. Сложение колебаний.

2. Молекулярная физика

Первое начало термодинамики. Внутренняя энергия как функция состояния. Теоремы Карно для КПД тепловой машины. Неравенство Клаузиуса. Определение энтропии, ее статистический смысл. Распределение молекул по скоростям. Закон Максвелла и его экспериментальная проверка. Распределение молекул газа во внешнем поле. Условие равновесия фаз. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса. Фазовая диаграмма.

3. Электричество

Электростатическое поле в вакууме. Принцип суперпозиции. Теорема Гаусса. Закон Ампера. Сила Лоренца. Действие магнитного поля на контур с током. Электромагнитная индукция. Закон Фарадея. Правило Ленца. Магнитное поле в вакууме. Закон Био-Савара-Лапласа. Теорема о циркуляции. Ток смещения. Уравнения Максвелла. Вектор Умова-Пойнтинга.

4. Оптика

Интерференция. Двухлучевая интерференция. Когерентность. Опыты Френеля и Юнга. Дифракция в параллельных лучах. Дифракция на одной щели. Дифракционная решетка. Принцип Гюйгенса-Френеля. Дифракция на круглом отверстии, круглом экране. Преломление и отражение электромагнитных волн на границе двух сред. Формулы Френеля. Полное внутреннее отражение.

5. Атомная и ядерная физика

Фотоэффект. Эффект Комптона. Спектральные термы. Комбинационный принцип Ритца. Постоянная Ридберга. Тонкая и сверхтонкая структура уровней атома водорода и водородоподобных атомов. Энергия связи ядра. Полуэмпирическая формула Вайцеккера для масс ядер. Капельная и оболочечная модели ядра. Общие законы радиоактивного распада.

СПЕЦИАЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ. Специальные вопросы физики полупроводников

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 AIV, AVI и соединений типов AШBV, AПBVІ, AIVBVІ.

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 структурах с пониженной размерностью

Полупроводниковые структуры пониженной размерности. 0D, 1D, 2D системы: примеры и свойства. Размерное квантование. Сверхрешетки. 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. Нанoeлектроника. М.: Бином, 2009.
9. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников. М.: ГРФМЛ Наука, 1978. 615 с.
10. Кравченко А.Ф., Овсяк В.Н. Электронные процессы в твердотельных системах пониженной размерности. Новосибирск, 2000. 448 с.
11. Зеегер К. Физика полупроводников. М.: Мир, 1977. 615 с.

Программа утверждена на заседании базовой кафедры нанотехнологий в электронике ФГБОУ ВО "ЯрГУ им. П.Г. Демидова" в ЯФ ФТИАН РАН 22 сентября 2023 года (протокол № 1).

Заведующий кафедрой

А.С. Рудый

Приложение 1 к Программе
вступительного испытания в
аспирантуру по научной
специальности 1.3.11 «Физика
полупроводников»

Образцы билетов вступительного экзамена

Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова

Дисциплина Вступительный экзамен в аспирантуру

1.3.11 Физика полупроводников

Билет № 1

1. Капельная и оболочечная модели ядра. Общие законы радиоактивного распада.
2. Уравнения движения электронов и дырок во внешних полях. Метод эффективной массы. Искривление энергетических зон в электрическом поле. Движение электронов и дырок в магнитном поле.

Декан физического факультета

И.С. Огнев

Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова

Дисциплина Вступительный экзамен в аспирантуру

1.3.11 Физика полупроводников

Билет № 2

1. Закон Ампера. Сила Лоренца. Действие магнитного поля на контур с током.
2. Межзонные переходы. Край собственного поглощения в случае прямых и непрямых, разрешенных и запрещенных переходов.

Декан физического факультета

И.С. Огнев

Приложение 2 к Программе
вступительного испытания в
аспирантуру по научной
специальности 1.3.11 «Физика
полупроводников»

Критерии оценки результатов сдачи вступительного экзамена

Ответ на теоретический вопрос

Высокий уровень: продемонстрированы полные и системные знания теоретических положений курса общей физики и специальных курсов, необходимых для успешной работы по данной научной специальности, умения приводить физические примеры, поясняющие материал вопроса, навыки физического мышления, четкой постановки проблемы, эффективного поиска ее решения, грамотного изложения материала; допускается не более двух незначительных неточностей в изложении материала.

Хороший уровень: требования в целом аналогичные высокому уровню, однако допускается большее число незначительных неточностей.

Удовлетворительный уровень: продемонстрировано относительно полное знание теоретических положений курса общей физики и специальных курсов, необходимых для успешной работы по данной научной специальности, умение сформулировать и в целом обосновать свою точку зрения; допускаются неточности в изложении материала, неполнота выводов при в целом правильном изложении материала.

Неудовлетворительный уровень: ответа нет; материал изложен не по конкретной теме вопроса; не продемонстрировано знание теоретических положений; допущены грубые ошибки в изложении материала.

Дополнительные структурные и количественные показатели

Показатели	Критерии
Понимание вопроса	<ul style="list-style-type: none">• Ответ существует• Ответ по существу вопроса без отвлечения на второстепенные детали
Содержание ответа	<ul style="list-style-type: none">• Продемонстрированы полные и системные теоретические знания по

	<p>вопросу</p> <ul style="list-style-type: none"> • Продемонстрированы полные и системные знания законов физики и умение их приложения к решению конкретных физических задач
Обоснованность и полнота ответа	<ul style="list-style-type: none"> • Раскрыты все компоненты вопроса • Сделаны правильные и физически обоснованные выводы по вопросу
Изложение ответа	<ul style="list-style-type: none"> • Владение навыками устной и (или) письменной речи • Свободное владение математическим аппаратом и специальной терминологией

Шкала оценивания: 0 баллов – полное отсутствие критерия; 1 балл – частичное выполнение критерия; 2 балла – полное выполнение критерия

Оценка проставляется по количеству набранных баллов:

менее 60% от максимально возможного количества баллов – «0 – 3,75 балла»,

60 – 75% от максимально возможного количества баллов, из них не менее 2 баллов за содержание ответа – «4 – 5,75 балла»,

76 – 85% от максимально возможного количества баллов, из них не менее 4 баллов за содержание ответа – «6 – 7,75 балла»,

86 – 100% от максимально возможного количества баллов, из них не менее 5 баллов за содержание – «8 – 10 баллов».