

**МИНИСТЕРСТВО ПРОСВЕЩЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ЛИПЕЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ П.П. СЕМЕНОВА-ТЯН-ШАНСКОГО»
(ЛГПУ имени П.П. Семенова-Тян-Шанского)**



УТВЕРЖДАЮ
Ректор ФГБОУ ВО
«ЛГПУ имени П.П. Семенова-Тян-Шанского»

Н.В. Федина
«28» декабря 2023 г.

**ПРОГРАММА ЭКЗАМЕНА ПО НАУЧНОЙ СПЕЦИАЛЬНОСТИ
ПРИ ПРИЕМЕ НА ОБУЧЕНИЕ ПО ПРОГРАММАМ
ПОДГОТОВКИ НАУЧНЫХ И НАУЧНО-ПЕДАГОГИЧЕСКИХ КАДРОВ В
АСПИРАНТУРЕ**

**НАИМЕНОВАНИЕ И ШИФР НАУЧНОЙ СПЕЦИАЛЬНОСТИ
1.3.11 ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ**

Липецк - 2023

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

Вступительные испытания по научной специальности аспирантуры 1.3.11. Физика полупроводников охватывают стандартные разделы университетских курсов по общей и теоретической физике. Также проверяются базовые умения математического аппарата.

Программа вступительных испытаний, перечень вопросов, структура контрольно-измерительного материала и критерии оценивания приведены ниже.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ВСТУПИТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Вступительное испытание проводится в устной форме на основе билетов. В каждом экзаменационном билете по 3 вопроса. Подготовка к ответу составляет 90 минут. Задания оцениваются от 0 до 100 баллов в зависимости от полноты и правильности ответов.

РАЗДЕЛ 1. РАЗДЕЛЫ И ТЕМАТИЧЕСКИЙ ПЛАН

1. Классическая электродинамика

Электрический заряд и его свойства. Закон Кулона. Принцип суперпозиции. Напряженность электростатического поля. Принцип суперпозиции электростатических полей. Электростатический закон Гаусса. Работа и потенциальная энергия электростатического поля. Теорема о циркуляции вектора электрической напряженности в электростатике. Потенциал электростатического поля. Взаимосвязь напряженности и потенциала электростатического поля. Энергия системы неподвижных зарядов.

Проводник в электростатическом поле. Электростатическая индукция. Электрическая емкость уединенного проводника. Электрическая емкость системы проводников. Конденсаторы. Электрический диполь. Диполь во внешнем электростатическом поле. Стационарное электрическое поле в различных типах диэлектриков. Поляризованность. Напряженность поля в диэлектрике. Вектор электрического смещения. Теорема Гаусса в диэлектрической среде. Условия на границе раздела двух диэлектрических сред.

Проводники и изоляторы. Электрический ток. Уравнение непрерывности. Законы Ома и Джоуля-Ленца в интегральной и дифференциальной формах. Условия существования постоянного электрического тока. Последовательное и параллельное соединение проводников. Разветвленные цепи. Правила Кирхгофа, их приложение к решению задач. Классическая электронная теория металлов. Модельные представления об электропроводности полупроводников. Электрический ток в электролитах. Законы Фарадея для электролиза. Электрический ток в газах и в вакууме.

Взаимодействие движущихся электрических зарядов. Магнитное поле. Магнитное поле движущегося заряда. Закон Био-Савара. Дивергенция и ротор вектора индукции магнитного поля. Теорема о циркуляции. Применение закона Био-Савара и теорема о циркуляции вектора магнитной индукции к расчету

магнитных полей. Сила Лоренца. Движение заряженной частицы в электрическом и магнитном полях. Сила Ампера. Работа, совершаемая при перемещении проводника с током в магнитном поле.

Плоский контур с током в магнитном поле. Магнитный момент. Магнитное поле в веществе. Намагниченность магнитного поля. Элементарная теория диа-, пара- и ферромагнетизма. Магнитный гистерезис. Точка Кюри. Основные уравнения магнитостатики в вакууме и магнетиках. Энергия и плотность энергии магнитного поля.

Явление электромагнитной индукции. Э.д.с. самоиндукции и взаимной индукции. Ток при замыкании и размыкании цепи с индуктивностью. Зарядка и разрядка конденсатора. Токи смещения. Система уравнений Максвелла как обобщение опытных фактов в электродинамике. Волновое уравнение. Скорость распространения электромагнитных волн. Плотность энергии. Плотность потока энергии. Вектор Умова-Пойтинга. Условие малости токов смещения. Квазистационарные токи.

2. Квантовая механика и физика твердого тела

Уравнение Шредингера. Основные свойства уравнения Шредингера. Одномерное движение. Одномерный осциллятор. Плотность потока. Квазиклассическая волновая функция. Прохождение через барьер.

Общие свойства движения частицы в центральном поле. Радиальное уравнение Шредингера. Атом водорода.

Спин. Оператор спина. Уравнение Паули. Тонкая структура атомных уровней. Эффект Зеемана.

Нестационарная теория возмущений. Квантовые переходы. Золотое правило Ферми. Излучение света атомами и молекулами. Ширина линии излучения. Спонтанные и вынужденные переходы.

Электронные состояния. Электронные колебательные и вращательные спектры.

Распределение Ферми-Дирака. Вырожденный идеальный ферми-газ. Распределение Бозе-Эйнштейна. Вырожденный бозе-газ. Конденсация Бозе-Эйнштейна. Равновесное тепловое излучение. Формула Планка.

Трансляционная симметрия кристаллов. Теорема Блоха. Функции Блоха. Обратная решетка. Зоны Бриллюэна. Зоны Бриллюэна кубических кристаллов. Периодические граничные условия Борна-Кармана. Уравнение для периодической части функции Блоха.

Энергия Ферми. Поверхность Ферми. Температурные зависимости уровня Ферми и концентрации носителей заряда (собственный полупроводник). Равновесные концентрации электронов и дырок в зонах (общий случай). Методы расчета электронного спектра.

Элементарная теория локальных энергетических уровней. Равновесные концентрации электронов и дырок в зонах (общий случай). Металлы, полупроводники и диэлектрики с точки зрения зонного приближения.

3. Физика полупроводников

Электронная конфигурация внешних оболочек атомов и типы сил связи в твердых телах. Ван-дер-Ваальсова, ионная и ковалентная связь. Примеси и

структурные дефекты в кристаллических и аморфных полупроводниках.

Структуры важнейших полупроводников. Симметрия кристаллов. Трансляционная симметрия кристаллов. Базис и кристаллическая структура. Элементарная ячейка. Примитивная ячейка. Ячейка Вигнера-Зейтца. Решетка Браве. Обозначения узлов, направлений и плоскостей в кристалле. Обратная решетка, ее свойства. Зона Бриллюэна.

Основные приближения зонной теории. Волновая функция электрона в периодическом поле кристалла. Теорема Блоха. Зона Бриллюэна. Энергетические зоны. Уровни энергии, создаваемые примесными центрами в полупроводниках. Доноры и акцепторы. Мелкие и глубокие уровни.

Уравнения движения электронов и дырок во внешних полях. Метод эффективной массы. Искривление энергетических зон в электрическом поле.

Кинетические коэффициенты - проводимость, постоянная Холла и термо-ЭДС. Дрейфовая скорость, дрейфовая и холловская подвижности, фактор Холла. Дрейфовый и диффузионный ток. Соотношение Эйнштейна.

Генерация и рекомбинация неравновесных носителей заряда. Уравнение кинетики рекомбинации. Времена жизни. Фотопроводимость.

Механизмы рекомбинации. Излучательная и безызлучательная рекомбинация.

4. Принципы действия полупроводниковых приборов и структуры пониженной размерности

Схема энергетических зон в контакте металл-полупроводник. Обогащенные, обедненные и инверсионные слои пространственного заряда вблизи контакта. Вольт-амперная характеристика барьера Шоттки.

Энергетическая диаграмма р-п перехода. Инжекция неосновных носителей заряда в р-п переходе. Вольтамперная характеристика р-п перехода. Приборы с использованием р-п переходов.

Туннельный диод. Диод Ганна. Биполярный транзистор. Тиристор.

Полевые транзисторы.

Фотоэлементы и фотодиоды. Фотоэлектрические преобразователи, КПД преобразования. Светодиоды и полупроводниковые лазеры.

Размерное квантование. Двумерные и квазидвумерные электронные системы и структуры, в которых они реализуются. Контра- и ковариантные композиционные сверхрешетки, легированные сверхрешетки легирования. Квантовые нити. Квантовые точки. Энергетический спектр электронов и плотность состояний в этих системах. Использование наноструктур в полупроводниковых приборах.

Основная литература

1. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. 5-е изд., стереотип. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. 224 с.,
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. М., Наука, 1994.
3. Бредов М.М., Румянцев В.В., и др. Классическая электродинамика. М., Наука, 1985.
4. Давыдов А.С. Квантовая механика. М., Наука, 2012.
5. Блохинцев Д.И. Основы квантовой механики. М., Наука, 2003.
6. Сивухин Д.В. Курс общей физики. М., Наука, 1988

7. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твердого тела. М., Высшая школа, 2000.
8. Займан Дж. Принципы теории твердого тела. М., Физматлит. 1988.
9. Уэрт Ч., Томсон Р. Физика твердого тела. М.: Мир, 1969.
10. Вонсовский С.В. Магнетизм. М.: Наука, 1971.
11. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. М.: Наука, 1979.
12. Шмидт В.В. Введение в физику сверхпроводимости. МЦ НМО, М., 2000.
13. Грундман М. Основы физики полупроводников. Нанопластика и технические приложения; под ред. В.А. Гергея .— 2-е изд. — Москва : Физматлит, 2012 .— 771 с.
14. Шалимова К.В. Физика полупроводников : учебник СПб.: Лань, 2010 .
15. Матухин В.Л. Физика твердого тела: учебное пособие .— СПб.: Лань, 2010 .— 218 с.
16. Епифанов Г.И. Физика твердого тела: учебное пособие. — СПб: Лань, 2010 .— 287с.
17. Гинзбург И.Ф. Введение в физику твердого тела. Основы квантовой механики и статистической физики с отдельными задачами физики твердого тела: учебное пособие СПб: Лань, 2007.— 537 с.
18. Тамм И.Е. Основы теории электричества. М., Наука, 1976.

Информационные ресурсы

В настоящее время библиотека ЛГПУ имени П.П. Семенова-Тян-Шанского располагает следующими полнотекстовыми электронными информационными ресурсами:

1. Научная Электронная Библиотека e-LIBRARY.RU. Полнотекстовая коллекция «Российские академические журналы on-line» (издательство «Наука») включает 139 журналов, включая РЖ ИНИОН. <http://elibrary.ru/>.
2. Научная «Электронная библиотека» <http://rucont.ru/>
3. Перечень основных профессиональных и реферативных журналов по профилю научной специальности: http://vak.ed.gov.ru/ru/help_deskyiist/.
4. Журнал «Физика и техника полупроводников» Электронная версия: <http://journals.ioffe.ru/journals/2>

РАЗДЕЛ 2. ПРИМЕРНЫЙ ПЕРЕЧЕНЬ ВОПРОСОВ К ЭКЗАМЕНУ

1. Электрический заряд и его свойства. Закон Кулона. Принцип суперпозиции. Напряженность электростатического поля.
2. Принцип суперпозиции электростатических полей. Электростатический закон Гаусса.
3. Работа и потенциальная энергия электростатического поля. Теорема о циркуляции вектора электрической напряженности в электростатике. Потенциал электростатического поля.
4. Взаимосвязь напряженности и потенциала электростатического поля. Энергия системы неподвижных зарядов.

5. Проводник в электростатическом поле. Электростатическая индукция. Электрическая емкость уединенного проводника. Электрическая емкость системы проводников. Конденсаторы.
6. Электрический диполь. Диполь во внешнем электростатическом поле. Стационарное электрическое поле в различных типах диэлектриков. Поляризованность. Напряженность поля в диэлектрике.
7. Вектор электрического смещения. Терма Гаусса в диэлектрической среде. Условия на границе раздела двух диэлектрических сред.
8. Проводники и изоляторы. Электрический ток. Уравнение непрерывности.
9. Законы Ома и Джоуля-Ленца в интегральной и дифференциальной формах. Условия существования постоянного электрического тока.
10. Последовательное и параллельное соединение проводников. Разветвленные цепи. Правила Кирхгофа и их применение.
11. Классическая электронная теория металлов. Модельные представления об электропроводности полупроводников.
12. Электрический ток в электролитах. Законы Фарадея для электролиза. Электрический ток в газах и в вакууме.
13. Взаимодействие движущихся электрических зарядов. Магнитное поле. Магнитное поле движущегося заряда. Закон Био-Савара.
14. Дивергенция и ротор вектора индукции магнитного поля. Теорема о циркуляции.
15. Сила Лоренца. Движение заряженной частицы в электрическом и магнитном полях. Сила Ампера. Работа, совершаемая при перемещении проводника с током в магнитном поле.
16. Плоский контур с током в магнитном поле. Магнитный момент. Магнитное поле в веществе. Намагниченность магнитного поля.
17. Элементарная теория диа-, пара- и ферромагнетизма. Магнитный гистерезис. Точка Кюри. Основные уравнения магнитостатики в вакууме и магнетиках.
18. Явление электромагнитной индукции. Э.д.с. самоиндукции и взаимной индукции.
19. Токи смещения. Система уравнений Максвелла как обобщение опытных фактов в электродинамике. Волновое уравнение.
20. Плотность энергии. Плотность потока энергии. Вектор Умова-Пойтинга. Условие малости токов смещения. Квазистационарные токи.
21. Уравнение Шредингера. Основные свойства уравнения Шредингера. Плотность потока.
22. Одномерное движение. Одномерный осциллятор. Прохождение через барьер.
23. Общие свойства движения частицы в центральном поле. Радиальное уравнение Шредингера. Атом водорода.
24. Спин. Оператор спина. Уравнение Паули. Тонкая структура атомных уровней. Эффект Зеемана.
25. Нестационарная теория возмущений. Квантовые переходы. Излучение света атомами и молекулами. Ширина линии излучения. Спонтанные и вынужденные переходы.
26. Электронные состояния. Электронные колебательные и вращательные

- спектры.
27. Распределение Ферми-Дирака. Вырожденный идеальный ферми-газ. Распределение Бозе-Эйнштейна. Вырожденный бозе-газ.
 28. Трансляционная симметрия кристаллов. Теорема Блоха. Функции Блоха. Обратная решетка. Зоны Бриллюэна. Зоны Бриллюэна кубических кристаллов.
 29. Периодические граничные условия Борна-Кармана. Уравнение для периодической части функции Блоха.
 30. Элементарная теория локальных энергетических уровней. Металлы, полупроводники и диэлектрики с точки зрения зонного приближения.
 31. Ван-дер-Ваальсова, ионная и ковалентная связь. Примеси и структурные дефекты в кристаллических и аморфных полупроводниках.
 32. Структуры важнейших полупроводников. Симметрия кристаллов. Трансляционная симметрия кристаллов. Базис и кристаллическая структура. Элементарная ячейка.
 33. Основные приближения зонной теории. Волновая функция электрона в периодическом поле кристалла. Теорема Блоха. Зона Бриллюэна.
 34. Энергетические зоны. Уровни энергии, создаваемые примесными центрами в полупроводниках. Доноры и акцепторы. Мелкие и глубокие уровни.
 35. Уравнения движения электронов и дырок во внешних полях. Метод эффективной массы. Искривление энергетических зон в электрическом поле.
 36. Кинетические коэффициенты - проводимость, постоянная Холла и термо-ЭДС. Дрейфовый и диффузионный ток. Соотношение Эйнштейна.
 37. Генерация и рекомбинация неравновесных носителей заряда. Уравнение кинетики рекомбинации. Фотопроводимость.
 38. Схема энергетических зон в контакте металл-полупроводник. Слои пространственного заряда вблизи контакта. Вольт-амперная характеристика барьера Шоттки.
 39. Энергетическая диаграмма р-п перехода. Инжекция неосновных носителей заряда в р-п переходе. Вольтамперная характеристика р-п перехода. Приборы с использованием р-п переходов.
 40. Туннельный диод. Диод Ганна.
 41. Биполярный транзистор. Тиристор.
 42. Полевые транзисторы. МДП транзисторы.
 43. Фотоэлементы и фотодиоды. Фотоэлектрические преобразователи, КПД преобразования. Светодиоды и полупроводниковые лазеры.
 44. Размерное квантование. Двумерные и квазидвумерные электронные системы и структуры, в которых они реализуются.

РАЗДЕЛ 3. ОБРАЗЕЦ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛА

Билет №1 (1.3.11 Физика полупроводников)

1. Работа и потенциальная энергия электростатического поля. Теорема о

циркуляции вектора электрической напряженности в электростатике.

Потенциал электростатического поля.

2. Уравнение Шредингера. Основные свойства уравнения Шредингера.

Плотность потока.

3. Полевые транзисторы. МДП транзисторы.

РАЗДЕЛ 4. КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ЗНАНИЙ ПРЕТЕНДЕНТОВ НА ПОСТУПЛЕНИЕ В АСПИРАНТУРУ

Вступительное испытание оценивает знания в области соответствующей научной дисциплины, навыки и способности поступающих, необходимые для обучения по программам аспирантуры, реализуемых направлением 03.06.01 Физика и астрономия. Экзамен включает ответы на три теоретических вопроса по темам программы вступительных испытаний в аспирантуру по соответствующему профилю. Вопросы являются равнозначными по сложности. Уровень знаний поступающего оценивается по 100-балльной системе.

Критерии оценивания результатов ответа по уровням (оценкам)

Оценка	Критерии
80 - 100 баллов	<ol style="list-style-type: none">1. Ответ грамотный, полный. Ответы излагаются логично, последовательно и не требуют дополнительных пояснений.2. Демонстрируются глубокие знания дисциплины специальности.3. Даны обоснованные ответы на дополнительные вопросы комиссии4. Ответы хорошо аргументированы, при ответах использованы знания, приобретённые ранее.5. В ответах четко проявляется способность к исследовательской деятельности.
60 - 79 баллов	<ol style="list-style-type: none">1. Ответ грамотный, ответы на поставленные вопросы в билете излагаются систематизировано и последовательно.2. Демонстрируется умение анализировать материал, однако не все выводы носят аргументированный и доказательный характер.3. Материал излагается уверенно, в основном правильно даны все определения и понятия.4. Допущены принципиальные неточности при выводах и использовании терминов.5. В ответах проявляется определенная способность исследовательской деятельности.

40 - 59 баллов	<ol style="list-style-type: none">1. Ответ в целом грамотный, но допускаются нарушения в последовательности изложения при ответе.2. Демонстрируются поверхностные знания дисциплин специальности.3. Имеются затруднения с выводами.4. Определения и понятия даны нечётко.5. Навыки исследовательской деятельности представлены слабо.
0 - 39 баллов	<ol style="list-style-type: none">1. Ответ неграмотный с принципиальными ошибками. Материал излагается непоследовательно, сбивчиво, не представляет определенной системы знаний по дисциплине.2. Не даны ответы на дополнительные вопросы комиссии.3. Допущены грубые ошибки в определениях и понятиях.4. Отсутствуют навыки исследовательской деятельности.