

Программа
вступительного испытания по специальной дисциплине
в аспирантуру НИЦ «Курчатовский институт»
по группе научных специальностей:
1.3. Физические науки
1.3.11 Физика полупроводников

1. Общие положения

1.1. Данная программа предназначена для подготовки к вступительным испытаниям в аспирантуру по специальной дисциплине. Программа вступительных испытаний в аспирантуру подготовлена в соответствии с федеральными государственными образовательными стандартами высшего образования (уровень магистра или специалиста).

Экзамен проводится с целью выявления у поступающего объёма научных знаний, научно-исследовательских компетенций, навыков системного и критического мышления, необходимых для обучения в аспирантуре. Поступающий должен показать профессиональное владение теорией и практикой в предметной области, продемонстрировать умение вести научную дискуссию.

1.2. Программой устанавливается:

форма, структура, процедура сдачи вступительного испытания;

шкала оценивания;

максимальное и минимальное количество баллов для успешного прохождения вступительного испытания;

критерии оценки ответов.

1.3. Вступительное испытание проводится на русском языке.

1.4. Организация и проведение вступительного испытания осуществляется в соответствии с Правилами приема, утвержденными приказом НИЦ «Курчатовский институт».

1.5. По результатам вступительного испытания, поступающий имеет право подать на апелляцию о нарушении, по мнению поступающего, установленного порядка проведения вступительного испытания и (или) о несогласии с полученной оценкой результатов вступительного испытания в порядке, установленном

Правилами приема, действующими на текущий год поступления.

2. Форма, процедура проведения и шкала оценивания вступительного испытания.

2.1. Вступительное испытание проводится в форме экзамена на основе билетов. Экзамен проходит в устной форме. Подготовка к ответу составляет 1 академический час (60 минут) без перерыва с момента раздачи билетов. Ответ на билет оценивается от 0 до 10 баллов в зависимости от полноты и правильности ответов.

Билет включает в себя два вопроса по общефизическим и математическим дисциплинам, один вопрос по дисциплине специализации.

Вопросы по общей физике охватывают следующие темы: колебания и волны, основы молекулярной физики, термодинамики, оптики, а также квантовой и ядерной физики.

Вопросы по высшей математике призваны определить на основе решения конкретных математических примеров уровень владения поступающим в аспирантуру математическими навыками, необходимыми при решении физических задач.

Вопросы специализации включают в себя вопросы по научной специальности 1.3.11 Физика полупроводников.

В случае проведения экзамена в дистанционном формате вступительное испытание проводится в режиме видеоконференцсвязи.

2.2. Экзамен по специальной дисциплине оценивается по 10-балльной шкале. Минимальное количество баллов, подтверждающее успешное прохождение вступительного испытания по специальной дисциплине, устанавливается равным 4 баллам.

Шкала оценивания

Оценка, баллы	Уровень подготовленности, характеризуемый оценкой
9-10	Поступающий уверенно владеет материалом, приводит точные формулировки теорем, процессов и явлений, и других утверждений, сопровождает их строгими и полными доказательствами, уверенно отвечает на дополнительные вопросы программы вступительного испытания.

6-8	Поступающий владеет материалом, приводит точные формулировки теорем, процессов и явлений, и других утверждений, сопровождает их доказательствами, в которых допускает отдельные неточности. Отвечает на большинство дополнительных вопросов по программе вступительного испытания.
4-5	Поступающий знаком с основным материалом программы, приводит формулировки теорем, процессов и явлений, и других утверждений, но допускает некоторые неточности, сопровождает их доказательствами, в которых допускает погрешности либо описывает основную схему доказательств без указания деталей. Отвечает на дополнительные вопросы по программе вступительного испытания, допуская отдельные неточности.
0-3	Поступающий не владеет основным материалом программы, не знаком с основными понятиями, не способен приводить формулировки теорем, процессов и явлений, и других утверждений, не умеет доказывать теоремы и другие утверждения, не знает даже схемы доказательств. Не отвечает на большинство дополнительных вопросов по программе вступительного испытания.

3. Вопросы к экзамену

3.1. Вопросы по общефизическим дисциплинам

1. Колебания, основы молекулярной физики и термодинамики

1. Свободные колебания системы без трения. Математический маятник. Физический маятник. Сложение гармонических колебаний одного направления. Биения. Затухающие колебания. Вынужденные колебания. Резонанс.

2. Различные формы записи уравнения состояния идеального газа. Уравнение адиабаты идеального газа. Работа, совершаемая идеальным газом при политропическом и адиабатическом процессе. Физический смысл энтропии идеального газа.

3. Число ударов молекул газа о стенку. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов.

4. Распределение Максвелла. Наиболее вероятная скорость молекул, средняя арифметическая и средняя квадратичная скорости молекул. Распределение Больцмана. Распределение молекул по координатам. Барометрическая формула.

5. КПД тепловой машины. КПД цикла Карно. Теорема Карно.

6. Явления переноса. Диффузия газов. Вязкость газов. Теплопроводность газов. Явления переноса. Диффузия газов. Газокинетический вывод выражения для коэффициента диффузии. Вязкость газов. Газокинетический вывод выражения для коэффициента вязкости. Теплопроводность газов. Газокинетический вывод выражения для коэффициента теплопроводности.

2. Основы электромагнетизма

7. Линии напряженности электрического поля и эквипотенциальные поверхности. Связь между напряженностью и потенциалом. Работа силы электрического поля. Потенциал.

8. Электрический диполь в однородном и неоднородном поле (вращательный момент, энергия, сила). Дипольный электрический момент системы зарядов. Поле электрического диполя.

9. Поле вне и внутри объемно заряженного шара. Поле одной и двух заряженных плоскостей.

10. Емкость. Конденсаторы. Емкость плоского конденсатора. Энергия заряженного конденсатора. Энергия электрического поля. Плотность энергии.

11. Сила и плотность тока. Закон Ома и закон Джоуля-Ленца в интегральной и дифференциальной формах. Мощность тока. Удельная тепловая мощность тока.

12. Магнитное поле равномерно движущегося заряда. Сила Лоренца. Сила, действующая на заряд, движущийся в магнитном поле.

13. Закон Био-Савара-Лапласа. Теорема о циркуляции. Поле в центре и на оси кругового тока. Поле бесконечного прямого тока. Контур с током в однородном и неоднородном магнитном поле (вращательный момент, энергия, сила).

14. Явление электромагнитной индукции. Правило Ленца. Э.Д.С. индукции. Индуктивность соленоида. Токи замыкания и размыкания. Энергия магнитного поля

15. Ток смещения. Полный ток. Уравнения Максвелла.

3. Основы волновой оптики

16. Волновое уравнение. Уравнение плоской волны.

17. Эффект Доплера для звуковых и электромагнитных волн.

18. Принцип Гюйгенса. Принцип Ферма. Законы отражения и преломления.

19. Явление интерференции. Сложение двух электромагнитных волн. Интенсивность суммарной волны.

20. Временная когерентность, длина когерентности на примере опыта Юнга с монохроматическим протяженным источником.

21. Способы наблюдения интерференции света (зеркало Ллойда, бипризма и бизеркала Френеля).

22. Интерференционные полосы равного наклона. Интерференционные полосы равной толщины. Простой клин.

23. Кольца Ньютона. Интерференция света на тонких пленках. Просветление оптики.

24. Графическое сложение амплитуд. Зоны Френеля.

25. Дифракция Френеля на круглом отверстии и на диске. Дифракция Френеля на щели. Дифракция Фраунгофера на щели.

26. Дифракционная решетка. Положение и угловая ширина главных дифракционных максимумов дифракционной решетки. Дисперсия и разрешающая способность дифракционной решетки.

27. Дифракция рентгеновских лучей. Формула Брэгга-Вульфа.

4. Основы квантовой физики, строения вещества, атомной и ядерной физики

28. Экспериментальные законы теплового излучения (Стефана-Больцмана, Вина).

29. Формула Планка. Вывод закона Стефана-Больцмана из формулы Планка.

30. Фотоэффект. Уравнение А.Эйнштейна для фотоэффекта.

31. Опыт Боте. Фотоны.

32. Эффект Комптона.

33. Постулаты Бора. Опыт Франка и Герца.

34. Элементарная боровская теория водородоподобного атома.

35. Гипотеза де-Бройля. Экспериментальные основания квантовой механики.

36. Соотношение неопределенностей Гейзенберга. Оценка размеров и минимальной энергии водородоподобного атома.

37. Соотношение неопределенностей Гейзенберга. Оценка минимальной энергии одномерного гармонического осциллятора.

38. Уравнение Шрёдингера. Физический смысл и свойства пси-функции.

39. Частица в одномерной бесконечно глубокой потенциальной яме. Результаты квантовой механики для одномерного гармонического осциллятора.

40. Результаты квантовой механики для водородоподобного атома.

41. Собственный механический и магнитный моменты электрона. Магнетон Бора.

42. Принцип Паули. Заполнение электронных оболочек атома. Электронные конфигурации.

43. Характеристические рентгеновские спектры. Закон Мозли.

44. Комбинационное рассеяние света. Эффект Рамана.

45. Энергетические зоны в твердых телах. Металлы, диэлектрики и полупроводники. Собственные и примесные полупроводники. Электронная и дырочная проводимость.

3.2. Высшая математика

1. Элементы теории чисел. Натуральные числа. Делимость. Целые, рациональные и действительные числа. Мнимые числа.

2. Функция, ее область определения и область значений. Возрастание, убывание, периодичность, четность, нечетность. Наибольшее и наименьшее значения функции. График функции.

3. Последовательности, предел последовательности. Пределы функций, предел функции по Коши.

4. Понятие производной функции. Основные правила дифференцирования функций. Нахождение экстремумов функции.

5. Понятие первообразной функции. Вычисление неопределенных и определённых интегралов, в том числе несобственных. Интегральная сумма.

6. Понятие числового ряда. Признаки сходимости числовых рядов. Степенные ряды. Разложение функции в ряд Тейлора. Остаточный член в ряде Тейлора.

7. Элементы линейной алгебры. Векторные пространства и линейные отображения, базисы, размерность, квадратичные формы.

8. Понятие матрицы. Действия с матрицами. Определитель матрицы и его вычисление.

9. Элементы теории групп. Линейные представления групп. Группы и алгебры Ли.

10. Гильбертовы пространства. Линейные операторы в гильбертовом пространстве. Понятие о спектре оператора. Линейные операторы и их матрицы в конечномерном вещественном и комплексном пространстве.

11. Система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Методы решения СЛАУ: метод Гаусса, метод Крамера. Критерий существования нетривиального решения системы однородных линейных алгебраических уравнений.

12. Понятия градиента функции, дивергенции, ротора и циркуляции векторного поля. Теоремы Остроградского-Гаусса и Стокса.

13. Понятие обыкновенного дифференциального уравнения. Уравнения первого порядка и методы их решения. Линейное дифференциальное уравнение произвольного порядка с постоянными коэффициентами. Методы его решения.

14. Система линейных дифференциальных уравнений первого порядка. Методы её решения.

15. Понятие аналитической функции. Разложение функции, аналитической в кольце, в ряд Лорана. Классификация изолированных особых точек. Вычеты. Основная теорема о вычетах и её приложения.

16. Основные уравнения математической физики. Классификация линейных дифференциальных уравнений с частными производными второго порядка с двумя независимыми переменными.

17. Преобразование Фурье и его основные свойства. Применение для решения дифференциальных уравнений.

18. Решение задачи Коши для волнового уравнения в одномерном случае.

19. Элементы теории вероятностей. Случайные величины и распределения вероятностей. Числовые характеристики случайных величин и вероятностных распределений.

20. Основы теории оценивания неизвестных параметров распределений. Статистическая проверка гипотез

Литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики: в 4 т. Москва: КНОРУС. Т.1: Механика. Молекулярная физика и термодинамика: учебное пособие для вузов. 2012. 522 с.

2. Савельев И.В. Курс общей физики: в 4 т. Москва: КНОРУС. Т.2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. 2009. 570 с.

3. Савельев И.В. Курс общей физики: учебное пособие в 4 т. Москва: КНОРУС. Т.3: Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц: учебное пособие для вузов. 2012. 360 с.

4. Иродов И.Е. Волновые процессы: основные законы: учебное пособие для вузов. Москва: Бином. Лаборатория знаний, 2015. 263 с.

5. Иродов И.Е. Квантовая физика: основные законы. Москва: Бином. Лаборатория знаний. 2014. 256 с.

6. Иродов И.Е. Электромагнетизм. Основные законы: учебное пособие для вузов. Москва: Бином. Лаборатория знаний, 2014. 320 с.

7. Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика: учебник. Санкт-Петербург: Лань. Т.1: Физика атомного ядра. 2009. 383 с.

8. Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика: учебник. Санкт-Петербург: Лань. Т. 2: Физика ядерных реакций. 2008. 318 с.

9. Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика: учебник. Санкт-Петербург: Лань. Т. 3: Физика элементарных частиц. 2008. 412 с.

10. Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов: учебное пособие. Санкт-Петербург: Лань, 2009. 608 с.

11. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике. М.: Астрель, АСТ, 2005. 992 с.

12. Беклемишев Д.В. Курс аналитической геометрии и линейной алгебры: учебник для вузов. Москва: Физматлит, 2009. 307 с.

13. Тихонов А.Н. Уравнения математической физики: Учеб. пособие для вузов. М.: МГУ; Наука, 2004. 798 с.

14. Мэтьюз Дж., Уокер Р. Математические методы физики. М., Атомиздат, 1972.

15. Гельфанд И.М. Лекции по линейной алгебре. М., Наука, 1971.

3.3. Вопросы по научной специальности 1.3.11 Физика полупроводников Химическая связь и атомная структура полупроводников

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

2. Структуры важнейших полупроводников – элементов A^{IV} , A^{VI} и соединений типов $A^{III}B^V$, $A^{II}B^{VI}$, $A^{IV}B^{VI}$.

3. 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.

4. Примеси и структурные дефекты в кристаллических и аморфных полупроводниках. Химическая природа и электронные свойства примесей. Точечные, линейные и двумерные дефекты.

2. Основы зонной теории полупроводников

1. Основы зонной теории кристаллических твердых тел. Основные приближения зонной теории. Уравнение Шредингера для электронов в кристалле в одноэлектронном приближении. Теорема Блоха. Квазиимпульс и зона Бриллюэна. Понятие об энергетических зонах. Основные различия между металлами, полупроводниками и диэлектриками с точки зрения зонной теории.

2. Обсуждение особенностей электронного энергетического спектра на основе метода слабо связанных электронов. Понятие об эффективной массе. Тензор обратных эффективных масс. Изоэнергетические поверхности.

3. Многодолинные полупроводники. Примеры зонных структур полупроводников: зоны проводимости полупроводников $A_{III} B_{V}$, Si, Ge. Прямозонные и непрямозонные полупроводники.

4. Уровни энергии, создаваемые примесными центрами в полупроводниках. Доноры и акцепторы. Мелкие и глубокие уровни. Водородоподобные примесные центры.

Кинетические явления в полупроводниках

1. Кристаллы во внешних полях. Неидеальные кристаллы. Средняя скорость движения электрона в кристалле. Уравнение движения электрона в кристалле во внешних полях. Кинетические коэффициенты – проводимость, постоянная Холла и термо-ЭДС. Дрейфовая скорость, дрейфовая и холловская подвижности, фактор Холла. Дрейфовый и диффузионный ток. Уравнения движения электронов и дырок во внешних полях. Метод эффективной массы. Искривление энергетических зон в электрическом поле. Движение электронов и дырок в магнитном поле. Определение эффективных масс из циклотронного (диамагнитного) резонанса. Связь зонной структуры с оптическими свойствами полупроводника.

2. Заполнение зон и введение дырочного описания. Метод эффективной массы. Применение метода эффективной массы для нахождения энергетического спектра полупроводниковых систем пониженной размерности. Энергетический спектр сверхрешеток. Движение и энергетический спектр носителей заряда в постоянном электрическом поле. Картина плавного искривления энергетических зон. Мелкие уровни в гомеополярных кристаллах (водородоподобные примесные центры). Условия применимости водородоподобной модели. Глубокие примесные уровни в полупроводниках.

Равновесная статистика электронов и дырок в полупроводниках

1. Равновесная статистика электронов и дырок в полупроводниках. Плотность состояний и функция распределения электронов по квантовым состояниям. Плотность состояний в системах пониженной размерности.

2. Концентрации электронов и дырок в зонах. Эффективные плотности состояний электронов и дырок в зонах. Невырожденный электронный (дырочный)

газ. Эффективная масса плотности состояний. Вычисление положения уровня Ферми в собственном полупроводнике. Статистика заполнения примесных уровней. Уровень Ферми в полупроводнике с примесями одного типа. Статистика электронов и дырок в компенсированных полупроводниках. Уровень Ферми в компенсированном полупроводнике. Многозарядные примесные центры.

Рекомбинация электронов и дырок в полупроводниках

1. Неравновесные электроны и дырки. Возникновение неравновесных носителей заряда в полупроводниках. Генерация и рекомбинация неравновесных носителей заряда. Квазиравновесие, квазиуровни Ферми. Уравнение кинетики рекомбинации. Времена жизни. Фотопроводимость.

2. Механизмы рекомбинации. Оптическая генерация. Темпы генерации и рекомбинации. Времена жизни электронов и дырок. Уравнение кинетики рекомбинации в пространственно однородных системах. Излучательная и безызлучательная рекомбинация. Межзонная рекомбинация. Рекомбинация через уровни примесей и дефектов. Центры прилипания. Оже-рекомбинация.

3. Пространственно неоднородные неравновесные распределения носителей заряда. Плотность тока. Соотношение Эйнштейна. Межзонная рекомбинация. Коэффициент межзонной рекомбинации. Время жизни при межзонной рекомбинации. Рекомбинация через примеси и дефекты.

Некристаллические полупроводники

1. Аморфные и стеклообразные полупроводники. Структура атомной матрицы некристаллических полупроводников. Идеальное стекло. Гидрированные аморфные полупроводники.

2. Особенности электронного энергетического спектра неупорядоченных полупроводников. Плотность состояний. Локализация электронных состояний. Щель подвижности.

3. Легирование некристаллических полупроводников.

4. Механизмы переноса носителей заряда. Прыжковая проводимость. Закон Мотта.

5. Спектры оптического поглощения некристаллических материалов. Правило Урбаха.

6. Нестационарные процессы. Определение дрейфовой подвижности по измерениям времени пролета. Дисперсионный перенос.

7. Влияние внешних воздействий на свойства некристаллических полупроводников. Метастабильные состояния.

Принципы действия полупроводниковых приборов

1. Вольтамперная характеристика p-n перехода. Приборы с использованием p-n переходов. Туннельный диод. Диод Ганна. Биполярный транзистор. Тиристор.

2. Энергетическая диаграмма структуры металл-диэлектрик-полупроводник (МДП). Полевые транзисторы на МДП-структурах. Приборы с зарядовой связью.

3. Шумы в полупроводниковых приборах.

4. Фотоэлементы и фотодиоды. Спектральная чувствительность и обнаружительная способность. Полупроводниковые детекторы ядерных излучений. Фотоэлектрические преобразователи, КПД преобразования.

5. Светодиоды и полупроводниковые лазеры. Инжекционные лазеры на основе двойной гетероструктуры.

Основная литература

1. Г.Г. Зегря, В.И. Перель. Основы физики полупроводников. М.Физматлит, 2009.

2. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников. Изд. 3-е, стер. – СПб.: Лань, 2008. – 618 с.

3. В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников. Физика полупроводников. М. Наука, 1990.

4. К.В. Шалимова. Физика полупроводников. М. Энергоатомиздат, 1985.

5. В.Л. Бонч-Бруевич и др. Сборник задач по физике полупроводников. М. Наука, 1987.

Дополнительная литература

1. П. Ю, М. Кардона. Введение в физику полупроводников. М.: Физматлит,

2002.

2. Р. Смит. Полупроводники. М. Мир, 1982.
3. К. Зеегер. Физика полупроводников. М.: Мир, 1977.
4. Дж. Блекмор. Статистика электронов в полупроводниках. М.: Мир, 1964.
5. А. Роуз. Основы теории фотопроводимости. М. Мир, 1966.
6. Н. Мотт, Э. Дэвис. Электронные процессы в некристаллических веществах.

Изд. 2-е, в 2-х тт. М., Мир, 1982.

7. Ю.И.Уханов «Оптические свойства полупроводников» М.: Наука, 1977