

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский
государственный университет им. Н.И. Лобачевского»**

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

УТВЕРЖДАЮ

Декан _____ Малышев А.И.
«__»_____2022 г.

**Программа вступительного испытания в аспирантуру
по специальной дисциплине**

Научная специальность:

1.3.11 – ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Нижний Новгород
2022 год

1. Структура вступительного испытания

Вступительное испытание по специальной дисциплине состоит из двух частей: экзамена по специальной дисциплине (оценивается по 10-балльной шкале) и собеседования по тематике предполагаемого диссертационного исследования (оценивается по 10-балльной шкале).

Программа вступительного испытания сформирована на основе ФГОС ВО магистратуры и/или специалитета по соответствующим направлениям/специальностям.

2. Процедура проведения вступительного испытания

Экзамен по специальной дисциплине принимается устно по билетам. Каждый билет содержит 2 вопроса.

Собеседование по тематике предполагаемого диссертационного исследования проводится на основе подготовленного поступающим реферата.

3. Содержание вступительного испытания

3.1. Содержание экзамена по специальной дисциплине

Вопросы к экзамену:

1. Общая характеристика (классификация) проводников электричества. Классическая теория электронной проводимости. Закон Ома. Механизмы образования носителей тока. Примесная и дырочная проводимость.
2. Основные химические классы полупроводников. Элементарные полупроводники. Полупроводники типа A3B5, A2B6, A4B6. Органические полупроводники.
3. Основы зонной теории твёрдого тела. Уравнение Шредингера. Свободная частица. Атом водорода. Уравнение Шредингера для кристалла. Основные приближения зонной теории твёрдого тела. Адиабатическое приближение и валентная аппроксимация. Одноэлектронное приближение. Энергетический спектр свободного электрона, атома и кристалла.
4. Волновая функция электрона в периодическом поле. Теорема Блоха. Следствия теоремы Блоха. Ячейка Вигнера-Зейтца. Зоны Бриллюэна в кубических кристаллах.
5. Приближение эффективной массы. Электроны и дырки в кристалле. Зонная модель твёрдых тел (металлы, полупроводники и диэлектрики). Заполнение зон.
6. Модель Кронига-Пенни.
7. Структура энергетических зон полупроводников. Понятие простой зонной структуры. Прямозонные и непрямозонные полупроводники. Зонная структура кремния, германия, арсенида галлия, антимонида индия и сложных алмазоподобных полупроводников ($\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ и т.п.).
8. Водородоподобная модель примесных центров и энергетических уровней в кристалле. Локализованные состояния на поверхности кристалла.
9. Статистика равновесных электронов и дырок в полупроводнике. Общая характеристика равновесного состояния. Принцип детального равновесия. Модель полупроводника.
10. Функция плотности состояний $g(E)$ и масса плотности состояний для стандартной и нестандартных зонных структур. Плотность состояний на дискретных примесных центрах.
11. Функция распределения. Определение уровня Ферми. Распределение электронов и дырок по энергии в энергетических зонах. Концентрации электронов и дырок в зонах и на примесных уровнях как функции уровня Ферми. Условие электрической нейтральности полупроводника.
12. Собственный полупроводник. Зависимость концентрации, уровня Ферми и ширины запрещённой зоны от температуры.

13. Условие равновесия электронов и дырок в невырожденном полупроводнике. Некомпенсированный примесный полупроводник. Зависимость концентрации и уровня Ферми от уровня легирования и температуры.
14. Компенсированный примесный полупроводник. Зависимость концентрации и уровня Ферми от уровня легирования и температуры.
15. Сильно легированные полупроводники. Вырождение электронного (дырочного) газа и его свойства.
16. Статистика неравновесных электронов и дырок. Время жизни носителей тока. Стационарные концентрации неравновесных носителей. Квазиуровни Ферми.
17. Уравнение непрерывности. Классификация механизмов рекомбинации.
18. Межзонная излучательная рекомбинация. Зависимость времени жизни от уровня легирования и температуры.
19. Межзонная безизлучательная рекомбинация. Зависимость времени жизни от уровня легирования и температуры.
20. Рекомбинация через ловушки. Зависимость времени жизни от уровня легирования и температуры.
21. Рекомбинация при наличии нескольких типов ловушек. Центры прилипания в полупроводниках и их влияние на кинетику неравновесных процессов в полупроводниках.
22. Оптические свойства твердых тел. Оптические коэффициенты. Механизмы поглощения света в полупроводниках. Собственное (фундаментальное или межзонное) поглощение. Эффект Франца-Келдыша. Эффект Бурштейна-Мосса. Экситоны и экситонное поглощение. Примесное поглощение излучения. Поглощение излучения свободными носителями.
23. Люминесценция полупроводников. Внутрицентровая (примесная) фотолюминесценция. Рекомбинационная фотолюминесценция в полупроводниках. Экситонная люминесценция. Межзонная фотолюминесценция. Примесная фотолюминесценция. Примесная фотолюминесценция на донорно-акцепторных парах. Кинетика фотолюминесценции. Температурная зависимость фотолюминесценции.
24. Стимулированное излучение. Твердотельные лазеры. 3-х и 4-х уровневые системы. Спектр излучения лазера. Угловая расходимость пучка. Мощность излучения. Рубиновый лазер. Лазер с модулированной добротностью. Лазерные материалы. Применение твердотельных лазеров. Полупроводниковые лазеры.
25. Явления переноса заряда в полупроводниках. Общая теория явлений переноса заряда. Общее выражение для плотности тока. Кинетическое уравнение Больцмана и его решение.
26. Рассеяние носителей тока. Время релаксации импульса. Механизмы рассеяния. Рассеяние на акустических и оптических фононах. Пьезоэлектрическое рассеяние. Рассеяние на ионизированной и нейтральной примеси.
27. Электропроводность полупроводников и связанные с ней явления. Дрейфовая подвижность. Рассеяние на акустических фононах, на ионизированной и на нейтральной примеси.
28. Температурная зависимость электропроводности полупроводников.

3.2. Требования к реферату по специальной дисциплине

Реферат по специальной дисциплине должен показать исследовательский потенциал абитуриента, его подготовленность к выполнению научно-исследовательской программы аспирантуры.

Объем реферата не должен превышать 10 страниц машинописного текста через 1,5 интервала, шрифт Times New Roman, номер 14; размеры полей: верхнее и нижнее – 2 см, левое – 3 см, правое – 1,0 см, выравнивание по ширине.

Реферат должен содержать краткий обзор литературы (состояние вопроса) по предмету исследования, формулировку и обоснование проблемы: ее актуальность, фундаментальные и прикладные аспекты, степень разработанности.

В текст реферата могут быть включены схемы, таблицы, рисунки, приложения.

Структура реферата:

- титульный лист (см. Приложение);
- введение (актуальность, цель, задачи, методы исследования);
- проблемы исследования, ожидаемые результаты;
- заключение (выводы);
- список литературы;
- список опубликованных и направленных в печать статей и материалов (при наличии).

В реферате автор должен показать знание текущего состояния исследований в выбранной научной области, умение анализировать литературные источники, делать выводы о перспективах предполагаемого исследования.

Реферат представляется в экзаменационную комиссию в сроки и по адресам, указанным в расписании вступительных испытаний, опубликованном на сайте <http://priem-phd.unn.ru/>.

4 Описание шкал оценивания

Экзамен по специальной дисциплине оценивается по 10-балльной шкале.

Собеседование по тематике предполагаемого диссертационного исследования на основе подготовленного поступающим реферата оценивается по 10-балльной шкале.

Минимальное количество баллов, подтверждающее успешное прохождение каждой части вступительного испытания, устанавливается равным 6 баллам. Результирующая оценка за вступительное испытание по специальной дисциплине складывается из оценки за экзамен по специальной дисциплине и оценки за собеседование по тематике предполагаемого диссертационного исследования на основе подготовленного поступающим реферата.

Шкала оценивания экзамена по специальной дисциплине

Оценка, баллы	Уровень подготовленности, характеризуемый оценкой
1	Нет ответа.
2	Нет понимания предмета.
3	Отсутствие правильной формулировки ответа на вопрос даже с помощью преподавателя.
4	Ответ с 3-мя и более грубыми ошибками, много неточностей, знания несистематические. Отсутствие правильной формулировки ответа на вопрос.
5	Ответ с 2-мя грубыми ошибками, много неточностей, знания несистематические. Отсутствие правильной формулировки ответа на вопрос даже с помощью преподавателя.
6	В целом положительный ответ с 3-4 незначительными ошибками. Умение с помощью преподавателя схематично, но правильно сформулировать ответ на поставленный вопрос.
7	В целом хороший ответ с несколькими незначительными ошибками, умение сопоставить теоретические знания. Умение правильно сформулировать ответ на поставленный вопрос. Владение информацией как минимум из одного источника основной литературы.
8	В целом полный ответ, демонстрирующий уверенные знания, с некоторыми неточностями, умение сопоставить теоретические знания. Свободное владение информацией из нескольких источников основной литературы.

9	Полный развернутый ответ, демонстрирующий системные знания, умение сопоставить теоретические знания, свободное владение информацией из нескольких источников основной и дополнительной литературы.
10	Полный развернутый ответ, демонстрирующий системные знания, умение сопоставить теоретические знания, свободное владение информацией из нескольких источников основной и дополнительной литературы. Иллюстрация ответа дополнительными примерами из собственных наблюдений и дополнительных источников информации.

Шкала оценивания собеседования на основе реферата

Оценка, баллы	Уровень подготовленности, характеризуемый оценкой
1	Содержание не соответствует теме реферата, материал не систематизирован и не структурирован, основные понятия проблемы не раскрыты; в постановке проблемы нет самостоятельности; в формулировании нового аспекта выбранной для анализа проблемы не продемонстрировано умение обобщать, сопоставлять различные точки зрения по рассматриваемому вопросу, аргументировать основные положения и выводы; неправильно оформлены ссылки на литературу; отсутствует культура изложения и оформления текста реферата
2	Содержание не соответствует теме реферата, материал плохо систематизирован и структурирован, основные понятия проблемы не раскрыты; в постановке проблемы нет самостоятельности; в формулировании нового аспекта выбранной для анализа проблемы не продемонстрировано умение обобщать, сопоставлять различные точки зрения по рассматриваемому вопросу, аргументировать основные положения и выводы; неправильно оформлены ссылки на литературу; отсутствует культура изложения и оформления текста реферата
3	Содержание не соответствует теме реферата, материал систематизирован и структурирован с недочетами, основные понятия проблемы раскрыты не полностью; в постановке проблемы отсутствует самостоятельность; правильно оформлены ссылки на литературу; отсутствует культура изложения и оформления текста реферата
4	Содержание соответствует теме реферата, но основные понятия проблемы не раскрыты; в формулировании нового аспекта выбранной для анализа проблемы не продемонстрировано умение обобщать, нет ссылок на литературу; отсутствует культура изложения и оформления текста реферата
5	Содержание соответствует теме реферата, но основные понятия проблемы не раскрыты; в формулировании нового аспекта выбранной для анализа проблемы не продемонстрировано умение обобщать, небрежно оформлены ссылки на литературу; отсутствует культура изложения и оформления текста реферата
6	Содержание соответствует теме реферата, материал систематизирован и структурирован, основные понятия проблемы раскрыты; правильно оформлены ссылки на литературу; отсутствует культура изложения и оформления текста реферата
7	Содержание соответствует теме реферата, материал систематизирован и структурирован, основные понятия проблемы раскрыты; правильно оформлены ссылки на литературу; продемонстрирована культура изложения и оформления текста реферата
8	Содержание соответствует теме реферата, материал систематизирован и структурирован, основные понятия проблемы раскрыты; в постановке проблемы присутствует новизна; правильно оформлены ссылки на литературу; продемонстрирована культура изложения и оформления текста реферата

9	Содержание соответствует теме реферата, материал систематизирован и структурирован, основные понятия проблемы раскрыты полностью и глубоко; в постановке проблемы присутствует новизна; в формулировании нового аспекта выбранной для анализа проблемы продемонстрировано умение обобщать, аргументировать основные положения и выводы; правильно оформлены ссылки на литературу; продемонстрирована культура изложения и оформления текста реферата
10	Содержание соответствует теме реферата, материал систематизирован и структурирован, основные понятия проблемы раскрыты полностью и глубоко; в постановке проблемы присутствует новизна и самостоятельность; в формулировании нового аспекта выбранной для анализа проблемы продемонстрировано умение обобщать, сопоставлять различные точки зрения по рассматриваемому вопросу, аргументировать основные положения и выводы; правильно оформлены ссылки на литературу; продемонстрирована культура изложения и оформления текста реферата

5. Источники для подготовки к экзамену

а) основная литература:

1. Шалимова К.В. Физика полупроводников.-М.: Энергия, 1976.-416 с.
<https://e.lanbook.com/book/167840>
http://spen.phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Shalimova.pdf
2. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твёрдого тела: Учеб.- 3-е изд., стер.- М: Высш. шк.- 2000.- 494 с.
<http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=44686&idb=0>
http://spen.phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Pavlov-Khokhlov.djvu
http://www.studmed.ru/pavlov-pv-hohlov-af-fizika-tverdogo-tela_0c8e3f3519f.html#
3. Киреев П.С. Физика полупроводников.-М.: Высш. шк., 1975.-584 с.
<http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=397920&idb=0>
http://spen.phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Kireev.pdf
http://www.studmed.ru/kireev-ps-fizika-poluprovodnikov_24cecbadf3e.html
4. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников.-М.: Наука, 1990.- 688 с.
<http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=445646&idb=0>
http://spen.phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=BonchBuevich-Poluprovodniki.djvu
5. Зи С. Физика полупроводниковых приборов.-М.: Мир, 1984.-Т. 1.-456 с.
<http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=324623&idb=0>
http://spen.phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Sze_2.djvu

б) дополнительная литература:

1. Зеегер К. Физика полупроводников.-М.: Мир, 1977.- 616 с.
<http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=85771&idb=0>
http://spen.phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Zeeger-Poluprovodniki.djvu
2. Фистуль В.И. Введение в физику полупроводников.-М.: Высш. шк., 1984.-352 с.
<http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=397943&idb=0>
http://spen.phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Fistul.pdf
3. Киттель Ч. Введение в физику твёрдого тела.-М.: Наука, 1978.-792 с.
http://www.studmed.ru/kittel-ch-vvedenie-v-fiziku-tverdogo-tela-v-2-h-tomah_9d52ded9eac.html
http://spen.phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Kittel-VvedVFizikuTvTela.djvu
4. Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. М. Радио и связь.1990.- 264 с.
<http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=454236&idb=0>
http://spen.phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Vikulin-Stafeev.pdf

5. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников. М. ФМЛ. 1978.-616 с.
<http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=397901&idb=0>
http://spen.phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Anselm-Poluprovodniki.djvu
https://e.lanbook.com/reader/book/71742/#book_name
6. Ю П., Кардона М. Основы физики полупроводников /Пер. с англ. И.И. Решиной. Под ред. Б.П. Захарчени.- 3-е изд.- М.: Физматлит, 2002.- 560 с.
http://spen.phys.unn.ru/library_dl.asp?fn=Yu-Cardona.pdf

в) интернет - ресурсы:

<http://www.lib.unn.ru/> - Фундаментальная библиотека ННГУ

<https://e.lanbook.com/> - Электронно-библиотечная система изд. «Лань»

<http://spen.phys.unn.ru/library.asp> - Электронная библиотека ФзФ ННГУ

<http://www.studmed.ru> - Учебно-методическая литература для студентов

<http://www.ph4s.ru> - Образовательный проект А.Н. Варгина

Составители:

_____/Павлов Д.А./

_____/Планкина С.М./

Программа одобрена на заседании методической комиссии физического факультета
(дата 22.12.2021, протокол № 19).

Председатель методической комиссии _____/ Перов А.А. /

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский
государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Реферат по специальной дисциплине

Научная специальность:

1.3.11 – Физика полупроводников

Тема:_____

Выполнил:

_____ Фамилия И.О.

Нижний Новгород

202_____