

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«ЮГО-ЗАПАДНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ЮЗГУ)

УТВЕРЖДАЮ
Председатель
Приемной комиссии

С.Г. Емельянов

(подпись)

« 28 » марта 2022 г.



**ПРОГРАММА
К ВСТУПИТЕЛЬНОМУ ЭКЗАМЕНУ В АСПИРАНТУРУ**

по научной специальности

1.3.11. Физика полупроводников

Курск 2022 г.

1. Основные особенности строения полупроводниковых материалов

1.1. Связи атомов в кристаллах: Ван-дер-Ваальсова, ионная, ковалентная, металлическая. Понятие об атомных и молекулярных орбиталях. Гибридизация атомных орбиталей. Плотность состояний и функция распределения электронов по квантовым состояниям. Концентрации электронов и дырок в зонах. Эффективные плотности состояний электронов и дырок в зонах.

1.2. Ковалентная химическая связь. Аллотропные формы углерода. Бозе- и Ферми-газы. Обменные взаимодействия. Невырожденный электронный (дырочный) газ. 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. Многозарядные примесные центры.

1.3. Фазовые превращения и диаграммы состояния полупроводниковых материалов. Квантовый размерный эффект. Спонтанное нарушение симметрии. Одночастотная функция Грина. Дисперсионные соотношения.

2. Кристаллография. Собственные атомные дефекты в полупроводниках

2.1. Пространственная группа симметрии кристалла. Сингонии (кристаллические системы). Точечные группы симметрии (кристаллические классы).

2.2. Решетки Браве. Индексы Миллера. Решетка типа алмаза.

2.3. Геометрические конфигурации точечных дефектов кристаллической решетки.

2.4. Краевые и винтовые дислокации. Вектор Бюргерса. Дефекты атомной упаковки. Дисклинации.

2.5. Аморфные полупроводники.

3. Зонная теория кристаллических полупроводников

3.1. Уравнение Шредингера для кристалла. Адиабатическое и одноэлектронное приближения. Концепция квазичастиц.

3.2. Теория квазисвободного и квазисвязанного электрона в кристалле. Модель Кронига–Пенни. Приближение эффективной массы.

3.3. Трансляционная симметрия кристалла. Функция Блоха. Обратная решетка. Квазиимпульс электрона проводимости. Зоны Бриллюэна.

3.4. Электронные вакансии (дырки) в кристаллах. Движение носителей заряда (электронов в s -зоне и дырок в v -зоне) во внешних силовых полях.

3.5. Зонная теория кристаллических материалов: металл, полуметалл, бесщелевой полупроводник, собственный (нелегированный) полупроводник, диэлектрик.

4. Примесные атомы в кристаллах. Легирование полупроводников

4.1. Водородоподобные примесные атомы в кристалле. Фактор вырождения энергетического уровня. Термическая и оптическая энергии ионизации примеси. Локальные центры (дефекты решетки) с отрицательной энергией корреляции в полупроводниках.

4.2. Диффузия примесных атомов в полупроводниках. Законы Фика.

4.3. Пороговая энергия образования атомных дефектов кристаллической решетки. Радиационные дефекты в полупроводниках.

4.4. Легирование полупроводников ионным внедрением. Трансмутационное легирование кристаллов.

4.5. Электрическая и магнитная активность примесных атомов и собственных дефектов в полупроводниках.

4.6. Предельная растворимость атомов примесей в кристаллической матрице. Твердые растворы.

5. Статистическая термодинамика полупроводников

5.1. Равновесные концентрации дефектов Френкеля и Шоттки в кристаллах.

5.2. Механические свойства полупроводников. Колебания кристаллической решетки. Акустические и оптические фононы. Распределение Бозе–Эйнштейна для фононов. Теплоемкость кристалла.

5.3. Уравнение состояния кристаллического диэлектрика. Тепловое расширение и плавление полупроводников. Жидкие полупроводники (расплавы).

5.4. Распределение Ферми–Дирака для электронов; уровень Ферми (химический потенциал). Концентрация электронов проводимости и дырок в легированном металле, полуметалле, бесщелевом и собственном полупроводниках.

5.5. Температурная зависимость концентрации делокализованных электронов и дырок в слабо легированном кристаллическом полупроводнике.

5.6. Сильно легированные полупроводники. Концентрационный фазовый переход кристаллического полупроводника из диэлектрического в металлическое состояние (переход Мотта).

5.7. Экранирование электростатического поля в ковалентных полупроводниках. Приближения Дебая–Хюккеля и Шоттки–Мотта.

5.8. Кинетическое уравнение Больцмана для электронов и фононов. Приближение времени релаксации.

5.9. Рассеяние носителей тока (заряда) на акустических и оптических фононах. Подвижность электронов проводимости и дырок, ограниченная рассеянием на ионах примеси.

5.10. Перенос ионов в кристаллах.

6. Гальваномагнитные и термоэлектрические явления в полупроводниках

6.1. Зонная электропроводность кристаллических полупроводников на постоянном токе. Эффективная масса электропроводности.

6.2. Прыжковая электропроводность. Миграция электронов (дырок) по водородоподобным атомам примеси в кристаллических полупроводниках.

6.3. Электропроводность полупроводников на переменном токе. Плазменная частота.

6.4. Классический эффект Холла. Магниторезистивный эффект.

6.5. Квантование энергии электрона проводимости в магнитном поле. Плотность одноэлектронных состояний.

6.6. Решеточная и электронная теплопроводности полупроводниковых кристаллов. Акусто-электронные явления.

6.7. Термоэлектрические и термомагнитные явления в полупроводниках.

6.8. Квантовый эффект Холла. Эталон электрического сопротивления.

6.9. Инжекционные токи в полупроводниках. Отрицательная дифференциальная электропроводность. Электреты.

6.10. Электрическая емкость полупроводникового диода с *pn*-переходом и структуры металл–диэлектрик–полупроводник.

7. Оптические процессы в полупроводниках. Генерация и рекомбинация носителей заряда

- 7.1. Фундаментальное (собственное) поглощение света в кристаллических полупроводниках. (Эффекты Бурштейна–Мосса и Франца–Келдыша.)
- 7.2. Излучательная рекомбинация электронов s -зоны и дырок v -зоны в кристаллических полупроводниках. Соотношение Ван Русбрека–Шокли.
- 7.3. Экситоны в прямозонных и непрямозонных полупроводниках. Излучательный распад экситона. Свободные и связанные экситоны.
- 7.4. Безызлучательная рекомбинация электронов и дырок на примесных атомах (модель Шокли–Рида–Холла).
- 7.5. Решеточное, примесное и межпримесное поглощение света в кристаллах.
- 7.6. Фотомагнитоэлектрический эффект в полупроводниках (эффект Кикоина–Носкова).
- 7.7. Ударная рекомбинация (рекомбинация Оже). Рекомбинация свободных носителей заряда на поверхности. Межпримесная излучательная рекомбинация в кристаллах.
- 7.8. Поглощение света свободными электронами и дырками в кристаллах.
- 7.9. Излучательная и безызлучательная рекомбинации в полупроводниках. Принцип Франка–Кондона. Бесфононные линии излучения в полупроводниках. (Оптический аналог эффекта Мёссбауэра.)
- 7.10. Прямые и не прямые переходы электронов на диаграмме «энергия–квазиимпульс» в кристаллических полупроводниках. Вертикальные и не вертикальные переходы на диаграмме «энергия–координата» в гетероструктурах. Нелинейные оптические процессы.

8. Физика поверхности и границ раздела полупроводников

- 8.1. Структура и свойства поверхности полупроводников. Окисление кристаллического кремния.
- 8.2. Электронное сродство и термоэлектронная эмиссия из кристалла.
- 8.3. Электронные состояния на поверхности кристалла. Автоэлектронная эмиссия из кристалла в вакуум.
- 8.4. Бикристаллы и поликристаллические полупроводники.
- 8.5. Варизонные полупроводники; гетеропереходы.

9. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов

- 9.1. Оптическая микроскопия поверхности полупроводников. Эллипсометрия полупроводниковых пленок.
- 9.2. Дифракционный анализ структуры кристаллов.
- 9.3. Четырехзондовый метод измерения электрического сопротивления полупроводниковых материалов.
- 9.4. Методы измерения гальваномагнитных и термоэлектрических эффектов в кристаллических полупроводниках.
- 9.5. Электронный парамагнитный (спиновый) резонанс в полупроводниках.
- 9.6. Циклотронный резонанс в полупроводниках. Определение эффективной массы электронов и дырок.
- 9.7. Зондовая микроскопия поверхности полупроводниковых материалов.
- 9.8. Методы измерения фотопроводимости и работы выхода электронов из кристаллов.
- 9.9. Емкостная спектроскопия полупроводниковых барьерных структур.

9.10. Измерение электро-, катодо- и фотолюминесценции полупроводников. Пьезоспектроскопия кристаллов.

10. Низкоразмерные полупроводниковые элементы и структуры

10.1. Классические и квантовые размерные эффекты в полупроводниках.

10.2. Сверхпроводимость. Квантование магнитного потока. Эффекты Джозефсона.

10.3. Квантование энергии и плотность состояний электронов проводимости в кристаллических пленках и проволоках (нитях).

10.4. Электроны, дырки и экситоны в квантовых ямах.

10.5. Полупроводниковые сверхрешетки. Фотонные кристаллы.

10.6. Нанотрубки: получение, структура, свойства и применение.

10.7. Неупорядоченные полупроводники. Элементы теории протекания.

11. Физика и технология полупроводниковых приборов

11.1. Выпрямление электрического тока на *pn*-переходе. Туннельный диод.

11.2. Полупроводниковые гетеропереходы. Электрические контакты металл–полупроводник и металл–диэлектрик–полупроводник.

11.3. Биполярные и полевые транзисторы: технология изготовления, принцип действия и схемы включения.

11.4. Основные технологические этапы изготовления интегральных схем.

11.5. Междолинные переходы электронов. Диод Ганна.

11.6. Полупроводниковые фотоприемники, светодиоды, лазеры.

11.7. Солнечные элементы: физика, технология и электроника.

11.8. Радиационные эффекты в полупроводниковых приборах.

11.9. Магнитные полупроводники. Спинтроника.

11.10. Полупроводниковые приборы на квантоворазмерных эффектах. Нанoeлектроника.

III. Список литературы

Основная литература

1. Андриевский Р.А., Рагуля А.В. Наноструктурные материалы.— М.: Академия, 2005.— 192 с.
2. Анималу А. Квантовая теория кристаллических твердых тел.— М.: Мир, 1981.— 574 с.
3. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников.— М.: Наука, 1978.— 616 с.
4. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников.— М.: Наука, 1990.— 688 с.
5. Брандт Н.Б., Кульбачинский В.А. Квазичастицы в физике конденсированного состояния.— М.: Физматлит, 2005.— 632 с.
6. Брудай И., Мерей Дж. Физические основы микротехнологии.— М.: Мир, 1985.— 496 с.
7. Бургуэн Ж., Ланно М. Точечные дефекты в полупроводниках. Экспериментальные аспекты.— М.: Мир, 1985.— 304 с.

8. Гантмахер В.Ф. Электроны в неупорядоченных средах.— М.: Физматлит, 2005.— 232 с.
9. Грибковский В.П. Полупроводниковые лазеры.— Минск: Университетское, 1988.— 304 с.
10. Гроссе П. Свободные электроны в твердых телах.— М.: Мир, 1982.— 272 с.
11. Демиховский В.Я., Вугальтер Г.А. Физика квантовых низкоразмерных структур.— М.: Логос, 2000.— 248 с.
12. Зеегер К. Физика полупроводников.— М.: Мир, 1977.— 616 с.
13. Зенгуил Э. Физика поверхности.— М.: Мир, 1990.— 536 с.
14. Имри Й. Введение в мезоскопическую физику.— М.: Физматлит, 2002.— 304 с.
15. Киреев П.С. Физика полупроводников.— М.: Высш. шк., 1975.— 584 с.
16. Кобаяси Н. Введение в нанотехнологию.— М.: Бином. Лаборатория знаний, 2005.— 134 с.
17. Кучис Е.В. Гальваномагнитные эффекты и методы их исследования.— М.: Радио и связь, 1990.— 264 с.
18. Нанотехнологии в электронике / Под ред. Ю.А. Чаплыгина.— М.: Техносфера, 2005.— 448 с.
19. Павлов Л.П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов.— М.: Высш. шк., 1987.— 239 с.
20. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы.— М.: Лань, 2001.— 480 с.
21. Поклонский Н.А., Вырко С.А., Поденок С.Л. Статистическая физика полупроводников. Курс лекций.— М.: КомКнига, 2005.— 264 с.
22. Ридли Б. Квантовые процессы в полупроводниках.— М.: Мир, 1986.— 304 с.
23. Розеншер Э., Винтер Б. Оптоэлектроника.— М.: Техносфера, 2004.— 592 с.
24. Смит Р. Полупроводники.— М.: Мир, 1982.— 560 с.
25. Солимар Л., Уолш Д. Лекции по электрическим свойствам материалов.— М.: Мир, 1991.— 504 с.
26. Таиров Ю.М., Цветков В.Ф. Технология полупроводниковых и диэлектрических материалов.— М.: Высш. шк., 1990.— 423 с.
27. Технология СБИС. В 2-х книгах / Под ред. С. Зи.— М.: Мир, 1986.— 404 с. + 453 с.
28. Фелдман Л., Майер Д. Основы анализа поверхности и тонких пленок.— М.: Мир, 1989.— 344 с.
29. Шаскольская М.П. Кристаллография.— М.: Высш. шк., 1984.— 376 с.
30. Ю П., Кардона М. Основы физики полупроводников.— М.: Физматлит, 2002.— 560 с.

Дополнительная литература

1. Алферов Ж.И. Двойные гетероструктуры: концепция и применения в физике, электронике и технологии // Успехи физических наук.— 2002.— Т. 172, № 9.— С. 1068—1086.
2. Аморфные и поликристаллические полупроводники / Под ред. В. Хейванга.— М.: Мир, 1987.— 160 с.
3. Андрушин Е.А., Силин А.П. Физические проблемы солнечной энергетики // Успехи физических наук.— 1991.— Т. 161, № 8.— С. 129—139.
4. Биннинг Г., Рорер Г. Сканирующая туннельная микроскопия — от рождения к юности // Успехи физических наук.— 1988.— Т. 154, № 2.— С. 261—278.
5. Бэрк Г.Ю. Справочное пособие по магнитным явлениям.— М.: Энергоатомиздат, 1991.— 384 с.
6. Вавилов В.С. Миграция атомов в полупроводниках и изменения числа и структуры дефектов, инициируемые возбуждением электронной подсистемы // Успехи физических наук.— 1997.— Т. 167, № 4.— С. 407—412.
7. Гиавер И. Туннелирование электронов и сверхпроводимость // Успехи физических наук.— 1975.— Т. 116, № 4.— С. 585—595.
8. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б. Магниторезонансное разупрочнение кристаллов // Природа.— 2002.— № 8.— С. 49—57.
9. Гонда С., Сэко Д. Оптоэлектроника в вопросах и ответах.— Л.: Энергоатомиздат, 1989.— 184 с.
10. Гуляев Ю.В. Акустоэлектроника (исторический обзор) // Успехи физических наук.— 2005.— Т. 175, № 8.— С. 887—895.
11. Джозефсон Б. Открытие туннельных сверхпроводящих токов // Успехи физических наук.— 1975.— Т. 116, № 4.— С. 597—603.
12. Захарченя Б.П., Коренев В.Л. Интегрируя магнетизм в полупроводниковую электронику // Успехи физических наук.— 2005.— Т. 175, № 6.— С. 629—635.
13. Килби Дж.С. Возможно становится реальным: изобретение интегральных схем // Успехи физических наук.— 2002.— Т. 172, № 9.— С. 1102—1109.
14. фон Клитцинг К. Квантованный эффект Холла // Успехи физических наук.— 1986.— Т. 150, № 1.— С. 107—126.
15. Крёмер Г. Квазиэлектрическое поле и разрывы зон. Обучение электронов новым фокусам // Успехи физических наук.— 2002.— Т. 172, № 9.— С. 1087—1101.
16. Лафлин Р.Б. Дробное квантование // Успехи физических наук.— 2000.— Т. 170, № 3.— С. 292—303.
17. Пономаренко В.П. Теллурид кадмия-ртути и новое поколение приборов инфракрасной фотоэлектроники // Успехи физических наук.— 2003.— Т. 173, № 6.— С. 649—665.
18. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник.— М.: Техносфера, 2005.— 592 с.
19. Цидильковский И.М. Электроны и дырки в поле сил инерции // Успехи физических наук.— 1975.— Т. 115, № 2.— С. 321—331.

20. Цуи Д. Соотношение беспорядка и взаимодействия в двумерном электронном газе, помещенном в сильное магнитное поле // Успехи физических наук.— 2000.— Т. 170, № 3.— С. 320—324.
21. Шикин В.Б., Шикина Ю.В. Заряженные дислокации в полупроводниковых кристаллах // Успехи физических наук.— 1995.— Т. 165, № 8.— С. 887—917.
22. Штёрмер Х. Дробный квантовый эффект Холла // Успехи физических наук.— 2000.— Т. 170, № 3.— С. 304—319.
23. Эсаки Л. Путешествие в страну туннелирования // Успехи физических наук.— 1975.— Т. 116, № 4.— С. 569—583.
24. Эткинс П. Кванты. Справочник концепций.— М.: Мир, 1977.— 496 с.

**Шкала оценивания и минимальное количество баллов,
подтверждающее успешное прохождение вступительного
испытания (для каждого вступительного испытания)**

Шкала оценивания (критерии выставления баллов)			
	50-65 баллов	66-84 баллов	85-100 баллов
49 баллов и менее	Минимальное количество баллов, подтверждающее успешное прохождение вступительного испытания – 50 баллов		
<p>Поступающий:</p> <p>- изложил менее 25% материала, требуемого федеральным государственным стандартом подготовки аспиранта по направлению;</p> <p>- продемонстрировал низкий уровень глубины изложения материала по направлению</p>	<p>Поступающий:</p> <p>- изложил от 50% до 75% материала, требуемого федеральным государственным стандартом подготовки аспиранта по направлению;</p> <p>- продемонстрировал уровень глубины изложения материала по направлению выше среднего</p>	<p>Поступающий:</p> <p>- изложил от 75% до 100% материала, требуемого федеральным государственным стандартом подготовки аспиранта по направлению;</p> <p>- продемонстрировал высокий уровень изложения материала по направлению.</p>	<p>Поступающий:</p> <p>- продемонстрировал владение материалом, как по полноте, так и по глубине полностью соответствующим требованиям федеральным государственным стандартом подготовки аспиранта по направлению;</p> <p>- владеет системой научных понятий, культурой мышления; фактами научных теорий; методами и процедурами профессиональной деятельности; умение поставить цель и сформулировать задачи, связанные с реализацией профессиональных функций.</p>

Программа обсуждена и рекомендована для вступительного экзамена в аспирантуру по научной специальности 1.3.11. «Физика полупроводников» на заседании кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики протокол № 9 16.03.2022 г.