

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе



Драгунов В.К.

« 16 » июня 2015 г.



Программа аспирантуры

Направление 16.06.01 Физико-технические науки и технологии

Направленность (специальность) 01.04.10 Физика полупроводников

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА
специальной дисциплины

«Физика полупроводников»

Индекс дисциплины по учебному плану: Б1.В.ОД.2

Всего: 252 часа

Семестр 5, 144 часа, в том числе 6 часов – контактная работа,
138 часа – самостоятельная работа,

Семестр 6, 108 часов, в том числе 6 часов – контактная работа,
66 часов – самостоятельная работа,
36 часов – контроль

Программа составлена на основе федерального государственного образовательного стандарта высшего образования (уровень подготовки кадров высшей квалификации) по направлению подготовки 16.06.01 Физико-технологические науки и технологии, утвержденного приказом министерства образования и науки РФ от 30 июля 2014 № 882, и паспорта специальности 01.04.10 Физика полупроводников, номенклатуры специальностей научных работников, утвержденной приказом Минобрнауки России от 25 февраля 2009 г. № 59.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Целью изучения дисциплины является формирование знаний, отвечающих *формуле специальности* применительно к *области исследований* соответствующей *отрасли науки*.

Задачей дисциплины являются:

- развитие способности эффективно использовать всю совокупность полученных ранее компетенций для применения в разработках и исследованиях в своей предметной области по теме научно-исследовательской работы;
- продемонстрировать результаты образования в аспирантуре.

В процессе освоения дисциплины **формируются следующие компетенции:**

- способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях (УК-1);
- способность следовать этическим нормам в профессиональной деятельности (УК-5);
- способность планировать и решать задачи собственного профессионального и личностного развития (УК-6);

- способность критически анализировать современные физико-технические проблемы, ставить задачи и разрабатывать программу исследования, выбирать адекватные способы и методы решения экспериментальных и теоретических задач, интерпретировать, представлять и применять полученные результаты (ОПК-1);
- способность владеть приемами и методами работы с персоналом, навыками организации научного коллектива, методами оценки качества и результативности труда, способностью оценивать затраты и результаты деятельности научно-производственного коллектива (ОПК-2);
- способность самостоятельно выполнять физико-технические научные исследования для оптимизации параметров объектов и процессов с использованием стандартных и специально разработанных инструментальных и программных средств (ОПК-3);
- способность участвовать в разработке и реализации проектов по интеграции высшей школы, академической и отраслевой науки, промышленных организаций и предприятий малого и среднего бизнеса (ОПК-4);
- способность анализировать состояние научной проблемы путем подбора, изучения и анализа литературных и патентных источников (ПК-2);
- способность самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области физики полупроводников и решать их с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего отечественного и зарубежного опыта (ПК-3).

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАЗОВАНИЯ, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

В результате освоения дисциплины обучающийся должен демонстрировать следующие результаты образования:

знать:

- классификацию твердых тел с точки зрения атомной структуры и зонной теории путем подбора, изучения и анализа литературных и патентных источников, информационных технологий (ПК-2);
- особенности электронной структуры, электрических, оптических и фотоэлектрических свойств полупроводниковых материалов и структур и современные достижения в данной области путем подбора, изучения и анализа литературных и патентных источников, информационных технологий (ПК-2).

уметь:

- критически анализировать и оценивать современные научные достижения в области физики полупроводников (УК-1);
- следовать этическим нормам в профессиональной деятельности (УК-5);
- планировать и решать задачи собственного профессионального и личностного развития (УК-6);
- применять методы расчета и моделирования структуры полупроводников (ПК-3);
- собирать, обрабатывать, анализировать и систематизировать научно-техническую информацию по физике полупроводников (ПК-2).

владеть:

- приемами и методами оценки параметров и характеристик полупроводниковых структур с использованием стандартных и специально разработанных инструментальных и программных средств (ОПК-3);
- навыками работы с информационными базами данных и поиска информации о свойствах полупроводников (ПК-3).

Формула специальности

«Физика полупроводников» – область фундаментальной и прикладной науки и техники, включающая экспериментальные и теоретические исследования физических свойств полупроводниковых материалов и композитных структур на их основе (включая гетероструктуры, МОП структуры и барьеры Шоттки), а также происходящих в них физических явлений, разработку и исследование технологических процессов получения полупроводниковых материалов и композитных структур на их основе, создание оригинальных полупроводниковых приборов и интегральных устройств. Значение научных и технических проблем для народного хозяйства, решаемых в рамках специальности, состоит в развитии физических принципов работы, технологий изготовления и реализации электронных и оптоэлектронных полупроводниковых приборов и интегральных устройств, используемых практически во всех областях человеческой деятельности.

Области исследований

1. Физические основы технологических методов получения полупроводниковых материалов, композитных структур, структур пониженной размерности и полупроводниковых приборов и интегральных устройств на их основе.
2. Структурные и морфологические свойства полупроводниковых материалов и композитных структур на их основе.

3. Примеси и дефекты в полупроводниках и композитных структурах.
4. Поверхность и граница раздела полупроводников, полупроводниковые гетероструктуры, контактные явления.
5. Электронные спектры полупроводниковых материалов и композиционных соединений на их основе.
6. Электронный транспорт в полупроводниках и композиционных полупроводниковых структурах.
7. Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках и в композиционных полупроводниковых структурах.
8. Спонтанная и стимулированная люминесценция в полупроводниковых материалах и композитных структурах, полупроводниковые лазеры и светоизлучающие устройства.
9. Неравновесные явления в полупроводниках и структурах. Электронная плазма.
10. Акустические и механические свойства полупроводников и композиционных полупроводниковых структур.
11. Динамика кристаллической решетки. Электрон-фононное взаимодействие.
12. Многочастичные взаимодействия в полупроводниках и композитных структурах.
13. Транспортные и оптические явления в структурах пониженной размерности.
14. Мезоскопические явления в полупроводниках и композитных структурах.
15. Некристаллические полупроводники. Органические полупроводники.
16. Магнитные полупроводники.
17. Моделирование свойств и физических явлений в полупроводниках и структурах, технологических процессов и полупроводниковых приборов.
18. Разработка физических принципов работы и создание приборов на базе

полупроводниковых материалов и композиционных полупроводниковых структур.

19. Разработка методов исследования полупроводников и композитных полупроводниковых структур.

Отрасль науки

технические науки (за исследования по п. 1, 8, 17, 18, 19), физико-математические науки (во всей области исследований).

Основная образовательная программа

1. Введение

В основу настоящей программы положены основные разделы физики полупроводников, касающиеся основных физических проблем данной области, основ технологии и работы приборов на базе полупроводниковых материалов.

Программа разработана экспертным советом Высшей аттестационной комиссии Министерства образования Российской Федерации по физике при участии Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, ИФП СО РАН, ИРЭ РАН, ФИАН им. П.Н. Лебедева, ИФМ РАН (Нижний Новгород) и СПбГТУ.

2. Химическая связь и атомная структура полупроводников

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

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

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.

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

3. Основы технологии полупроводников и методы определения их параметров

Методы выращивания объемных монокристаллов из жидкой и газовой фаз.

Методы выращивания эпитаксиальных пленок (эпитаксия из жидкой и газовой фазы).

Молекулярно-лучевая эпитаксия. Металлорганическая эпитаксия.

Методы легирования полупроводников.

Основные методы определения параметров полупроводников: ширины запрещенной зоны, подвижности и концентрации свободных носителей, времени жизни неосновных носителей, концентрации и глубины залегания уровней примесей и дефектов.

4. Основы зонной теории полупроводников

Основные приближения зонной теории. Волновая функция электрона в периодическом поле кристалла. Теорема Блоха. Зона Бриллюэна. Энергетические зоны.

Законы дисперсии для важнейших полупроводников. Изоэнергетические поверхности. Тензор обратной эффективной массы. Плотность состояний. Особенности Ван-Хова.

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.

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

5. Равновесная статистика электронов и дырок в полупроводниках

Функция распределения электронов. Концентрация электронов и дырок в зонах, эффективная плотность состояний. Невырожденный и вырожденный электронный (дырочный) газ. Концентрации электронов и дырок на локальных уровнях. Факторы вырождения примесных состояний.

Положение уровня Ферми и равновесная концентрация электронов и дырок в собственных и примесных (некомпенсированных и компенсированных) полупроводниках. Многозарядные примесные центры.

6. Кинетические явления в полупроводниках

Кинетические коэффициенты – проводимость, постоянная 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. Горячие электроны. Отрицательная дифференциальная проводимость. Электрические неустойчивости; электрические домены и токовые шнуры.

7. Рекомбинация электронов и дырок в полупроводниках

Генерация и рекомбинация неравновесных носителей заряда. Квазиравновесие, квазиуровни Ферми. Уравнение кинетики рекомбинации. Времена жизни. Фотопроводимость.

Механизмы рекомбинации. Излучательная и безызлучательная рекомбинация. Межзонная рекомбинация. Рекомбинация через уровни примесей и дефектов. Центры прилипания. Оже-рекомбинация.

Пространственно неоднородные неравновесные распределения носителей заряда. Амбиполярная диффузия. Эффект Дембера. Длина диффузии неравновесных носителей заряда.

8. Контактные явления в полупроводниках

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.

Варизонные полупроводники.

9. Свойства поверхности полупроводников

Поверхностные состояния и поверхностные зоны. Искривление зон, распределение заряда и потенциала вблизи поверхности. Поверхностная рекомбинация.

Эффект поля.

Таммовские уровни. Скорость поверхностной рекомбинации.

10 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. Экситонное поглощение и излучение. Спонтанное и вынужденное излучение.

Поглощение света на свободных носителях заряда.

Поглощение света на колебаниях решетки. Рассеяние света колебаниями решетки, комбинационное рассеяние на оптических фононах (Рамана –

Ландсберга), рассеяние на акустических фононах (Бриллюэна – Мандельштама).

Влияние примесей на оптические свойства. Примесная структура оптических спектров вблизи края собственного поглощения в прямозонных и непрямозонных полупроводниках. Межпримесная излучательная рекомбинация. Экситоны, связанные на примесных центрах.

Оптические явления во внешних полях. Эффект Франца-Келдыша. Эффект Поккельса.

Эффект Бурштейна-Мосса.

Эффекты Фарадея и Фойгта.

11. Фотоэлектрические явления

Примесная и собственная фотопроводимость. Влияние прилипания неравновесных носителей заряда на фотопроводимость.

Оптическая перезарядка локальных уровней и связанные с ней эффекты. Термостимулированная проводимость.

Фоторазогрев носителей заряда.

Фотоэлектромагнитный эффект.

12. Некристаллические полупроводники

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

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

Легирование некристаллических полупроводников.

Механизмы переноса носителей заряда. Прыжковая проводимость. Закон Мотта.

Спектры оптического поглощения некристаллических материалов.
Правило Урбаха.

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

Влияние внешних воздействий на свойства некристаллических полупроводников. Метастабильные состояния.

13. Полупроводниковые структуры пониженной размерности и сверхрешетки

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.

Оптические явления в структурах с квантовыми ямами, правила отбора для межзонных и внутризонных (межподзонных) переходов. Межзонное поглощение и излучательная рекомбинация в этих структурах. Экситоны в квантовых ямах, квантово-размерный эффект Штарка.

Электрические и гальваномагнитные явления в двумерных структурах. Эффект Шубникова-де Гааза. Общее представление о квантовом эффекте Холла.

14. Принципы действия полупроводниковых приборов

Вольтамперная характеристика $p-n$ перехода. Приборы с использованием $p-n$ переходов.

Туннельный диод. Диод Ганна. Биполярный транзистор. Тиристор.

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

Шумы в полупроводниковых приборах.

Фотоэлементы и фотодиоды. Спектральная чувствительность и обнаружительная способность. Полупроводниковые детекторы ядерных излучений. Фотоэлектрические преобразователи, КПД преобразования. Светодиоды и полупроводниковые лазеры. Инжекционные лазеры на основе двойной гетероструктуры.

Использование наноструктур в полупроводниковых приборах. Гетеротранзистор с двумерным электронным газом (HEMT). Гетеролазеры на основе структур с квантовыми ямами и квантовыми точками. Резонансное туннелирование в двухбарьерной гетероструктуре и резонансно-туннельный диод. Оптический модулятор на основе квантово-размерного эффекта Штарка.

ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОСВОЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБРАЗОВАНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Промежуточная аттестация по итогам освоения дисциплины: 5 семестр – зачет, 6 семестр – кандидатский экзамен.

Вопросы для самоконтроля и для проведения экзамена

1. Типы химических связей.
2. Классификация типов связи в твердых телах. Ковалентная связь.
3. Ионные и ионно-ковалентные связи.
4. Взаимодействие Ван дер Ваальса. Молекулярные кристаллы.
5. Движение электрона в кристалле.
6. Уравнение Шредингера, волновая функция, ее физический смысл.
7. Принцип Паули.
8. Колебания одноатомной и двухатомной цепочек. Оптические и акустические ветви колебаний.
9. Фононы. Число мод и плотность состояний фононов.
10. Трансляционная симметрия кристаллов.
11. Зоны Бриллюэна.
12. Точечные, линейные и двумерные дефекты в кристаллах.
13. Методы определения основных параметров полупроводников.

14. Основные приближения зонной теории полупроводников.
15. Зонная теория. Валентная зона и зона проводимости. Запрещенная зона.
16. Зависимость E_g от температуры.
17. Эффективная масса носителей.
18. Заполнение зон электронами
19. Донорные и акцепторные примеси в полупроводниках.
20. Собственный, донорный и акцепторный полупроводники. Уравнение электронейтральности.
21. Функция распределения электронов.
22. Невырожденный и вырожденный полупроводники.
23. Уровень Ферми. Зависимость положения уровня Ферми от температуры.
24. Эффективная плотность состояний и ее зависимость от температуры. Собственная концентрация.
25. Заполнение зон электронами в случае вырожденного полупроводника. Функция распределения Ферми-Дирака.
26. Заполнение зон электронами в случае невырожденного полупроводника. Функция распределения Максвелла-Больцмана.
27. Эффективная плотность состояний и ее зависимость от температуры. Собственная концентрация.
28. Зависимость от температуры концентрации носителей и положения уровня Ферми.
29. Механизмы рассеяния носителей заряда.
30. Подвижность носителей заряда. Зависимость подвижности от температуры и концентрации ионов примеси.
31. Электропроводность полупроводников и ее зависимость от температуры. Определение E_g по температурным зависимостям электропроводности.

32. Время жизни носителей заряда.
33. Механизмы рекомбинации. Максвелловское время релаксации.
34. Диффузионная длина неравновесных носителей заряда.
35. Неравновесные носители заряда. Понятие квазиуровня Ферми.
36. Уравнение непрерывности для подвижных носителей заряда.
Граничные условия.
37. Скорость поверхностной рекомбинации.
38. Диффузионные и дрейфовые токи. Коэффициент диффузии.
Соотношение Эйнштейна.
39. Уравнения для плотности токов. Неравновесные носители в
электрическом поле. Диффузионная длина.
40. Уравнение Пуассона.
41. Генерационно-рекомбинационные процессы.
42. Барьер Шоттки. Схема энергетических зон.
43. Энергетическая диаграмма р-п перехода.
44. Гетеропереходы и варизонные полупроводники.
45. Поверхностная рекомбинация.
46. Оптические константы полупроводника.
47. Прямые и непрямые оптические переходы. Край собственного
поглощения.
48. Механизмы поглощения света в полупроводниках.
49. Примесная и собственная фотопроводимость в полупроводниках.
50. Особенности электронного спектра неупорядоченных
полупроводников.
51. Дефекты в неупорядоченных полупроводниках.
52. Методы управления свойствами неупорядоченных полупроводников.
53. Сверхрешетки, квантовые нити и квантовые ямы.
54. Оптические, электрические и гальваномагнитные явления в двумерных
структурах.

55. Контактные явления в полупроводниках. Понятие работы выхода и энергии сродства.
56. Контакт электронного и дырочного полупроводника. Контактная разность потенциалов. Область пространственного заряда.
57. Распределение концентрации носителей.
58. Энергетические диаграммы *pn*-перехода.
59. Вольт-амперная характеристика *pn*-перехода.
60. Явление инжекции и экстракции.
61. Распределение концентрации носителей в *pn*-переходе при нулевом и обратном смещении.
62. Генерационно-рекомбинационные процессы в ОПЗ. Понятие эффективной времени жизни носителей.
63. Барьерная и диффузионная емкость *pn*-перехода
64. Вольтамперная характеристика *pn*-перехода.
65. Приборы на основе *pn*-перехода.
66. Лавинный, туннельный и тепловой пробой *pn*-перехода. Влияние сопротивление базы на ВАХ *pn*-перехода
67. Приборы на основе наноструктур.

Критерии оценки за освоение дисциплины определены в Инструктивном письме И-23 от 14 мая 2012 г.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Основная литература:

1. Шалимова К.В. /Физика полупроводников. СПб.: издательство Лань. 2010. 384 с. ISBN 978-5-8114-09228-8.
2. Ансельм А. И. Введение в теорию полупроводников изд. СПб.: изд. Лань., 2008., 615 с. ISBN 978-5-8114-0762-0
3. Коледов Л.А. Технология и конструкция микросхем, микропроцессоров и микросборок – М.: изд-во “Лань “, 2008. ISBN 978-5-8114-0766-8.
4. Гуртов В.А. Твердотельная электроника : учебное пособие / В. А. Гуртов. – 2-е изд., доп. – М. : Техносфера, 2008. ISBN 978-5-94836-187-1

5. Старосельский В.И. Физика полупроводниковых приборов микроэлектроники: учеб. Пособие. – М.: Высшее образование; Юрайт-Издат, 2009. – 463 с. – (Основы наук). ISBN 978-5-9692-0962-6.

6. Оура К., Лифшиц В.Г., Саранин А.А., Зотов А.В., Катаяма М. Введение в физику поверхности. М.: Наука, 2006. – 490 с.

Дополнительная литература:

7. Sze S.M., Kwok Kwok Ng. Physics of semiconductor devices. John Wiley and Sons, 2007 – 815 p.

8. Лебедев А.И. Физика полупроводниковых приборов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 488 с. ISBN 978-5-9221-0995-6.