

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе
д.т.н. проф. Драгунов В.К.



« 27 » мая 2022 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА
специальной дисциплины 1.3.11, Физика полупроводников

Москва 2022

Программа составлена на основе паспорта специальности научных работников и программы - минимум кандидатского экзамена по специальности 1.3.11. Физика полупроводников, утвержденных экспертным советом Высшей аттестационной комиссии, и в соответствии с Положением о подготовке научных и научно- педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре), утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 30 ноября 2021г. № 2122.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Целью дисциплины является изучение специальных разделов физики полупроводников, относящихся к физическим процессам в электронике для последующего применения полученных знаний при разработке технологии создания полупроводниковых приборов.

Задачами дисциплины являются:

- развитие знаний обучающихся в области физики полупроводников и полупроводниковых приборов;
- познакомить обучающихся с физическими основами методов получения полупроводниковых материалов, композитных структур, структур пониженной размерности;
- познакомить обучающихся со структурными и морфологическими свойствами полупроводниковых материалов и композитных структур на их основе; оптическими и фотоэлектрическими явлениями в полупроводниках и в композиционных полупроводниковых структурах; транспортными, акустическими и механическими свойствами различных, в том числе некристаллических полупроводников и композиционных полупроводниковых структур;
- научить создавать новые системы полупроводников и композиционных полупроводниковых структур;
- научить разработке физических принципов работы и методов исследования приборов на базе полупроводниковых материалов и композиционных полупроводниковых.

МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ПРОГРАММЫ АСПИРАНТУРЫ

Специальная дисциплина в структуре программы аспирантуры входит в Блок 2 «Образовательный компонент. Общая трудоемкость составляет 7 зачетных единиц (з.е.).

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 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. Квантоворазмерные структуры.
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.

17. Моделирование свойств и физических явлений в полупроводниках и структурах.

18. Разработка физических принципов работы приборов на базе полупроводниковых материалов и композиционных полупроводниковых структур.

19. Разработка методов исследования полупроводников и композитных полупроводниковых структур.

Отрасль науки

- технические науки;
- физико-математические науки.

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.

Общие вопросы

Предмет и структура современной физики полупроводников. Место физики полупроводников среди других наук. Основные исторические этапы развития физики полупроводников. Области применения физики полупроводников и перспективы ее дальнейшего развития.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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 фонах (Рамана – Ландсберга), рассеяние на акустических фонах (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.

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.

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.

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.

Принципы действия полупроводниковых приборов

Вольтамперная характеристика pn -перехода. Приборы с использованием pn -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 (НЕМТ). 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.

Вопросы для самоконтроля:

1. Какие типы химических связей Вы знаете?
2. Классификация типов связи в твердых телах. Для каких полупроводников характерна ковалентная связь?
3. Для каких полупроводников характерны ионные и ионно-ковалентные связи?
4. В чем заключается взаимодействие Ван дер Ваальса? Что такое молекулярные кристаллы?
5. Поясните движение электрона в кристалле.
6. Поясните важность уравнения Шредингера, понятие волновой функции, ее физический смысл.
7. Сформулируйте Принцип Паули. В чем смысл этого принципа?
8. Поясните законы колебания одноатомной и двухатомной цепочек. Что такое оптические и акустические ветви колебаний?
9. Кто ввел понятие «Фононы»? Каково число мод и плотность состояний фононов?
10. Что такое трансляционная симметрия кристаллов? Поясните на примерах.
11. Для чего было введено понятие «Зоны Бриллюэна»? Что такое закон дисперсии? Приведите примеры этого закона.
12. Поясните термины: точечные, линейные и двумерные дефекты в кристаллах.
13. Какие методы определения основных параметров полупроводников Вы знаете? Поясните физические основы перечисленных методов.
14. Приведите основные приближения зонной теории полупроводников. Для каких материалов они применимы?
15. Поясните термины: зонная теория, валентная зона и зона проводимости, запрещенная зона.

16. Какие зависимость ширины запрещённой зоны от температуры Вы знаете. Приведите значения ширины запрещенной зоны при комнатной температуре основных полупроводников.
17. Что означает термин: эффективная масса носителей? Поясните понятия продольной и поперечной масс.
18. Поясните принципы заполнения зон электронами.
19. Что такое донорные и акцепторные примеси в полупроводниках? Поясните термины с помощью энергетических диаграмм.
20. Что такое собственный, донорный и акцепторный полупроводники? Напишите для них уравнения электронейтральности.
21. Напишите и поясните функции распределения электронов.
22. Поясните термины: невырожденный и вырожденный полупроводники.
23. Что такое уровень Ферми? Поясните зависимость положения уровня Ферми от температуры.
24. Что такое эффективная плотность состояний? Поясните ее зависимость от температуры. Что такое «собственная концентрация»?
25. Поясните процесс заполнения зон электронами в случае вырожденного полупроводника. Функция распределения Ферми-Дирака. Поясните графический метод определения концентрации носителей заряда в случае вырожденного полупроводника.
26. Поясните процесс заполнение зон электронами в случае невырожденного полупроводника. Функция распределения Максвелла-Больцмана. Поясните графический метод определения концентрации носителей заряда в случае невырожденного полупроводника.
27. Поясните зависимость от температуры концентрации носителей и положения уровня Ферми.
28. Какие механизмы рассеяния носителей заряда Вы знаете? Поясните на рисунке механизмы рассеяния.
29. Что такое подвижность носителей заряда? Поясните зависимость подвижности от температуры и концентрации ионов примеси.
30. Дайте определение электропроводности полупроводников. Каковы различия в температурных зависимостях электропроводности у металлов и полупроводников? Как определить ширины запрещённой зоны по температурным зависимостям электропроводности? Энергию активации примеси?
31. Поясните термин «время жизни носителей заряда». Зависимость времени жизни от температуры.
32. Какие механизмы рекомбинации Вы знаете? Что такое максвелловское время релаксации? Как оно связано с параметрами полупроводника?
33. Что такое коэффициент диффузии? Как коэффициент диффузии связан с подвижностью носителей?
34. Что такое коэффициент диффузии, диффузионная длина неравновесных носителей заряда? Каков ее физический смысл? Как экспериментально ее определить?

35. Поясните термины «неравновесные носители заряда», квазиуровень Ферми.
36. Напишите уравнение непрерывности для подвижных носителей заряда. Поясните граничные условия.
37. Что означает термин «скорость поверхностной рекомбинации»?
38. Поясните термины: диффузионные и дрейфовые токи? Напишите уравнения для плотности токов, уравнение Пуассона. Поясните, в каких процессах и в каких полупроводниковых приборах существенную роль играют каждый из этих токов?
39. Что такое «барьер Шоттки»? Нарисуйте схемы энергетических зон барьера Шоттки. Поясните вольт-амперные характеристики диода Шоттки.
40. Нарисуйте и поясните энергетические диаграммы p-n перехода при нулевом, прямом и обратном смещениях.
41. Поясните термины «гетеропереходы» и «варизонные полупроводники». В чем заключается «правило Андерсона»?
42. Поясните термины «оптические константы полупроводника»: что можно отнести к константам? Как они связаны между собой? Какие оптические характеристики Вы знаете?
43. Какие механизмы поглощения света в полупроводниках Вы знаете?
44. Поясните термины: «прямые и непрямые оптические переходы». Что такое «край собственного поглощения»? Какова зависимость коэффициента поглощения от длины волны (энергии фотона) падающего излучения для этих переходов? Как определить ширину запрещенной зоны по спектральным характеристикам?
45. Поясните термин: «примесная и собственная фотопроводимость в полупроводниках». Как примесная и собственная фотопроводимость в полупроводниках зависит от температуры полупроводника?
46. Сформулируйте особенности электронного спектра неупорядоченных полупроводников.
47. Какие дефекты в неупорядоченных полупроводниках Вы знаете?
48. Поясните методы управления свойствами неупорядоченных полупроводников.
49. Поясните термины: сверхрешетка, квантовые нити и квантовые ямы. Каковы особенности плотности состояний в этих структурах? Где структуры применяются?
50. Оптические, электрические и гальваномагнитные явления в двумерных структурах.
51. Контактные явления в полупроводниках. Поясните на энергетической диаграмме понятие работы выхода и энергии сродства.
52. Поясните энергетическую диаграмму контакта электронного и дырочного полупроводников (pn-перехода), отметьте контактную разность потенциалов, область пространственного заряда. Поясните, как изменится энергетическая диаграмма при повышении температуры, изменении степени легирования полупроводника?

53. Поясните распределение концентрации носителей при термодинамическом равновесии, прямом и обратном смещениях.
54. Поясните вольт-амперную характеристику (ВАХ) pn -перехода. Как ВАХ диода зависит от материала и температуры? Каково влияние сопротивления базы на ВАХ pn -перехода? Поясните термины «инжекция» и «экстракция».
55. Поясните генерационно-рекомбинационные процессы в ОПЗ, понятие «эффективной времени жизни носителей».
56. Поясните понятия «барьерная» и «диффузионная» емкость pn -перехода.
57. Какие приборы на основе pn -перехода Вы знаете. Поясните принцип работы этих приборов и их вольт-амперные характеристики.
58. Поясните термины: лавинный, туннельный и тепловой пробой pn -перехода.
59. Какие приборы на основе наноструктур Вы знаете?

Вопросы, включенные в билеты для проведения экзамена:

1. Уравнение Шредингера. Потенциальная и кинетическая энергии в УШ – общий случай. Волновая функция и ее свойства. Волновой вектор. Волновая функция для свободной частицы. Закон дисперсии для свободной частицы.
2. Ячейки Вигнера-Зейтца и принцип построения зоны Бриллюэна.
3. Адиабатическое приближение или приближение Борна-Оппенгеймера. Одноэлектронное приближение или метод Хартри – Фока.
4. Самосогласованное поле. Функции Блоха.
5. Приближение сильной связи в трехмерных кристаллах. Распределение плотности вероятности обнаружения e -нов от расстояния. Энергия возмущения. Обменный интеграл. Энергетические зоны. Закон дисперсии для твердого тела. Фактор вырождения.
6. Приближение слабой связи (почти свободных электронов). Модель Кронига-Пенни. Прозрачность барьера. Закон дисперсии $E(k)$. Бегущие и стоячие волны. Схема приведенных зон.
7. Граничные условия Кармана-Борна. Квантование волновой функции и энергетических состояний. Число состояний в энергетической зоне.
8. Закон дисперсии для твердого тела. Зависимость энергии электрона от квазиволнового вектора у дна и потолка энергетической зоны. Понятие дырки. Зависимость эффективной массы от $k(p)$.
9. Зависимость эффективной массы от $k(p)$. Изоэнергетические поверхности. Физический смысл эффективной массы. Компоненты тензора обратной эффективной массы e -на в кристалле. Закон дисперсии и понятие легких и тяжелых дырок. Приближение эффективной массы.

10. Зонная структура некоторых полупроводников (на Ваш выбор), параметры зонной структуры, определяющие возможность и эффективность использования данного полупроводника для конкретных практических приложений.
11. Гармонические колебания. Колебания одноатомной линейной цепочки. Уравнение смещения. Энергия колебаний атомов одномерной решетки. Закон дисперсии. Скорость звука и фазовая скорость. Групповая скорость.
12. Колебания двухатомной линейной цепочки. Уравнение смещения. Акустические и оптические колебания. Закон дисперсии. Колебания атомов трехмерной решетки.
13. Фононы. Статистика Бозе-Эйнштейна.
14. Собственные и легированные полупроводники. Типы и роль примесей в полупроводниках. Уравнение электронейтральности.
15. Элементарная ячейка и ее объем. Объем фазового пространства. Вырождение по энергии. Плотность квантовых состояний электронов в зависимости от энергии. Случай 3D, 2D, 1D и нульмерного электронного газа.
16. Понятие эффективной массы плотности состояний для электронов на примере Si и Ge.
17. Функции распределения электронов по энергиям Ферми и Больцмана. Понятие энергии Ферми. Заполнение зоны Брюллиэна электронами. Графический метод определения концентрации носителей в полупроводнике.
18. Уравнение электронейтральности. Расчет положения уровня Ферми и концентрации электронов в собственном полупроводнике. Закон действующих масс.
19. Температурная зависимость ширины запрещенной зоны. Расчет положения уровня Ферми в собственном полупроводнике. Зависимость собственной концентрации от обратной температуры.
20. Положение уровня Ферми и концентрация электронов в донорном полупроводнике в невырожденном случае в зависимости от температуры. Определение концентрации ННЗ.
21. Положение уровня Ферми и концентрация дырок в акцепторном полупроводнике в невырожденном случае. Определение концентрации ННЗ.
22. Определение концентрации носителей заряда и температурной зависимости в реальных полупроводниках. Определение ширины запрещенной зоны и энергии активации.
23. Статистика электронов и дырок в реальных полупроводниках (Ge, Si, GaAs, InSb - на Ваш выбор). Понятие эффективной плотности квантовых состояний. Ширина запрещенной зоны.
24. Теория электропроводности Друде-Лоренца. Ее сильные свойства и недостатки. Понятие электронного газа. Среднеквадратичная

- скорость электрона. Средняя длина свободного пробега. Среднее время свободного пробега. Дрейфовая подвижность.
25. Электропроводность. Связь проводимости с длиной свободного пробега.
 26. Теория электропроводности на основе кинетического уравнения Больцмана. Равновесная и неравновесная функции распределения. Время релаксации.
 27. Понятие подвижности. Эффективное сечение рассеяния. Вероятность рассеяния. Процессы рассеяния.
 28. Рассеяние на ионах примеси. Среднее время релаксации и его зависимость от температуры. Зависимость подвижности от температуры при рассеянии на ионах примеси. Рассеяние на нейтральных атомах примеси.
 29. Рассеяние на колебаниях решетки. Зависимость подвижности от температуры
 30. Температурная зависимость подвижности носителей заряда.
 31. Температурная зависимость удельной проводимости. Определение ширины запрещенной зоны.
 32. Энергия электронного сродства. Термоэлектронная работа выхода. Ток термоэлектронной эмиссии. Термодинамическая работа выхода.
 33. Эффект Холла. Слабые магнитные поля. Монополярный случай. Коэффициент или постоянная Холла. Определение концентрации носителей заряда. Холловская подвижность.
 34. Эффект Холла. Слабые магнитные поля. Биполярная проводимость. Угол Холла. Коэффициент или постоянная Холла. Матричный способ рассмотрения эффекта Холла. Влияние сильных магнитных полей.
 35. Эффект магнитосопротивления. Физический и геометрический эффект.
 36. Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда в случае монополярной проводимости. Дебаевская длина экранирования, ее физический смысл.
 37. Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда в полупроводнике с проводимостью, близкой к собственной. Биполярные подвижность, времена жизни, коэффициент диффузии. Высокий уровень инжекции.
 38. Генерация и рекомбинация электронов и дырок. Равновесные и неравновесные носители заряда. Уравнение непрерывности. Виды рекомбинации. Квазиуровни Ферми. Графическое определение концентрации носителей.
 39. Поглощение и отражение оптического излучения. Закон Бугера-Ламберта. Коэффициент поглощения. Длина свободного пробега фотона.

40. Основные типы оптического поглощения. Квантовый подход к физике оптических переходов. Вертикальность оптических переходов. Правило отбора.
41. Поглощение сильно легированных и аморфных полупроводников. Собственное поглощение в сильном электрическом поле (эффект Келдыша – Франца).
42. Собственное поглощение (прямые и не прямые переходы). Разрешенные и запрещенные переходы. Определение ширины запрещенной зоны.
43. Примесное поглощение. Поглощение при переходах между примесными уровнями. Поглощение колебаниями кристаллической решетки.
44. Механизмы рекомбинации. Межзонная излучательная рекомбинация. Время жизни неравновесных НЗ при межзонной излучательной рекомбинации. Температурная зависимость времени жизни носителей заряда при рекомбинации через рекомбинационные ловушки.
45. Экситонное поглощение. Экситоны Френкеля и Ванье–Мотта. Собственные значения энергии экситона. Свободные и связанные экситоны. Спектры поглощения экситона.
46. Влияние внешних воздействий на собственное поглощение полупроводников: температуры, давления, магнитного поля. Уровни Ландау. Экспериментальное определение эффективной массы.
47. Фотопроводимость при наличии поверхностной рекомбинации и диффузии носителей заряда. Эффект Дембера.
48. Контакт металл-полупроводник. Энергетические диаграммы. Запирающие и антизапирающие контакты. Выпрямление тока на контакте металл – полупроводник. Ширина и емкость ОПЗ.
49. Диодная и диффузионная теории выпрямления. Условие применения. Диодная теория выпрямления, ток насыщения. Диффузионная теория выпрямления, ток насыщения.
50. Контакт электронного и дырочного полупроводников. Область пространственного заряда. Контактная разность потенциалов. Распределения концентрации носителей при смещении. Энергетические диаграммы *pn*-перехода. Вольтамперная характеристика *pn*-перехода.
51. Теория тонкого *p-n* перехода. Диффузионная длина. Ток насыщения.
52. Контакт вырожденных электронного и дырочного полупроводников. Туннельный диод. Энергетические диаграммы и ВАХ туннельного диода.

ПРОМЕЖУТОЧНАЯ АТТЕСТАЦИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Промежуточная аттестация проводится в форме экзамена.

Требования и критерии оценивания ответов экзамена

В процессе экзамена оценивается уровень научно-исследовательской компетентности аспиранта, что проявляется в квалифицированном представлении результатов обучения.

При определении оценки учитывается грамотность представленных ответов, стиль изложения и общее оформление, способность ответить на поставленный вопрос по существу.

Критерии выставления оценки на экзамене:

Оценка «ОТЛИЧНО» выставляется аспиранту, который показал при ответе на вопросы экзаменационного билета и на дополнительные вопросы, что владеет материалом изученной дисциплины, свободно применяет свои знания для объяснения различных явлений и решения задач.

Оценка «ХОРОШО» выставляется аспиранту, в основном правильно ответившему на вопросы экзаменационного билета и на дополнительные вопросы, но допустившему при этом непринципиальные ошибки.

Оценка «УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО» выставляется аспиранту, который в ответах на вопросы экзаменационного билета допустил существенные и даже грубые ошибки, но затем исправил их сам

Оценка «НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО» выставляется аспиранту, который:

- а) не ответил на вопросы экзаменационного билета
- б) при ответе на дополнительные вопросы обнаружил незнание большого раздела экзаменационной программы.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

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.
7. Попов А. И. Физика и технология неупорядоченных полупроводников. Учебное пособие. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008.

Дополнительная литература:

8. Sze S.M., Kwok Kwok Ng. Physics of semiconductor devices. John Wiley and Sons, 2007 – 815 p.
9. Лебедев А.И. Физика полупроводниковых приборов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 488 с. ISBN 978-5-9221- 0995-6.
10. Popov A. Disordered Semiconductors: Physics and Applications. Textbook. – Pan Stanford Publishing, 2011.
11. Электронные свойства неупорядоченных систем / А.Г. Забродский, С.А. Немов, Ю.И. Равич – С-П.: «Наука», 2000.

Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:
(программное обеспечение, на которое кафедра или МЭИ имеет лицензию, а также свободно распространяемое программное обеспечение)

Интернет-ресурсы, включая профессиональные базы данных и информационные справочные системы:

Университетская информационная система «РОССИЯ»
<https://uisrussia.msu.ru>

Справочно-правовая система «Консультант+» <http://www.consultant-urist.ru>

Справочно-правовая система «Гарант» <http://www.garant.ru>

База данных Web of Science <https://apps.webofknowledge.com/>

База данных Scopus <https://www.scopus.com>

Портал открытых данных Российской Федерации <https://data.gov.ru>

База открытых данных Министерства труда и социальной защиты РФ
<https://rosmintrud.ru/opendata>

База данных Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU
<https://elibrary.ru/>

База данных профессиональных стандартов Министерства труда и социальной защиты РФ <http://profstandart.rosmintrud.ru/obshchiy-informatsionnyy-blok/natsionalnyy-reestr-professionalnykh-standartov/>

Базы данных Министерства экономического развития РФ
<http://www.economy.gov.ru>

База открытых данных Росфинмониторинга <http://www.fedsfm.ru/opendata>

Электронная база данных «Издательство Лань» <https://e.lanbook.com>

Федеральная государственная информационная система «Национальная электронная библиотека» <https://нэб.рф>

Национальный портал онлайн обучения «Открытое образование»
<https://openedu.ru>

Электронная база данных "Polpred.com Обзор СМИ"
<https://www.polpred.com>

Официальный сайт Федерального агентства по техническому
регулированию и метрологии <http://protect.gost.ru/>

Электронная библиотека МЭИ <https://ntb.mpei.ru/e-library/index.php>.

ПРОГРАММУ СОСТАВИЛ:

Доцент кафедры электроники и
наноэлектроники
к.т. н.

А.Д. Баринов

Заведующий кафедрой электроники и наноэлектроники

д.т. н., профессор

И.Н. Мирошникова

Директор ИРЭ
к.т.н., доцент

Р.С. Куликов

«СОГЛАСОВАНО» (при необходимости)

Заведующий кафедрой физики и технологии электротехнических материалов
и компонентов
докт. техн. наук, доцент

А.З. Славинский