

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»
Физический факультет

УТВЕРЖДАЮ

И.о. декана физического факультета МГУ,
профессор, д.ф.-м.н.



/ В.В. Белокуров /

» испртс 2024 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Физика полупроводников

Physics of semiconductors

Программа (программы) подготовки
научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре
Физика полупроводников
(103-01-00-1311-фмн)

Москва 2024

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с Приказом по МГУ от 24 ноября 2021 года № 1216 «Об утверждении Требований к основным программам подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре, самостоятельно устанавливаемых Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова».

1. Краткая аннотация:

Название дисциплины: Физика полупроводников.

Цель изучения дисциплины – расширение и углубление знаний о современном состоянии и тенденциях развития в области физики полупроводников.

2. Уровень высшего образования - подготовка кадров высшей квалификации.

3. Научная специальность: 1.3.11 Физика полупроводников; область науки: естественные науки.

4. Место дисциплины (модуля) в структуре Программы аспирантуры: дисциплины (модули), направленные на подготовку к кандидатским экзаменам - Дисциплина, совпадающая с наименованием научной специальности.

5. Объем дисциплины (модуля) в зачетных единицах с указанием количества академических или астрономических часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающихся:

Объем дисциплины (модуля) составляет 3 зачетных единицы, всего 108 часов, из которых 54 часа составляет контактная работа аспиранта с преподавателем (48 часов занятия лекционного типа, 6 часов мероприятия текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации), 54 часа составляет самостоятельная работа учащегося.

6. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия.

Необходимы знания высшей математики и общей физики в объеме курсов, преподаваемых на физических специальностях классических университетов, полученных на предыдущих уровнях высшего образования.

7. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля), форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	Всего (часы)	В том числе								
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них						Самостоятельная работа обучающегося, часы из них		
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Групповые консультации	Индивидуальные консультации	Учебные занятия, направленные на проведение текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации	Всего	Выполнение домашних заданий	Подготовка к коллоквиумам	Всего
Тема 1. 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 и соединений типов $A_{III}B_V$, $A_{II}B_{VI}$, $A_{IV}B_{VI}$ и др. Симметрия кристаллов. Трансляционная симметрия кристаллов. Базис и кристаллическая структура. Элементарная ячейка.	6	3					3	4		4

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).										
Тема 2. 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 заряда, времени жизни неосновных носителей заряда, концентрации и глубины залегания уровней	6	3					3	5		5

примесей и дефектов).										
Тема 3. 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).	8	4					4	5		5
Тема 4. Равновесная статистика электронов и дырок в	10	4				2	6	4		4

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).										
Тема 5. 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.	8	4					4	4		4

Рассеяние носителей заряда на заряженных и нейтральных примесях. Горячие электроны. Отрицательная дифференциальная проводимость. Электрические неустойчивости; электрические домены и токовые шнуры).										
Тема 6. Неравновесные носители заряда 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	4					4	4		4
Тема 7. Контактные явления в полупроводниках (Схема энергетических зон в	8	4					4	4		4

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).										
Тема 8. 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).	8	2				2	4	4		4
Тема 9. Оптические явления в полупроводниках (Комплексная диэлектрическая проницаемость, показатель преломления, коэффициент отражения, коэффициент поглощения. Связь между ними и соотношения Крамерса-Кронига. Межзонные переходы. Край	8	4					4	4		4

собственного поглощения в случае прямых и не прямых, 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 не прямозонных 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).										
Тема 10. Фотоэлектрические явления (Примесная и собственная фотопроводимость. Влияние	8	4					4	4		4

прилипания неравновесных носителей заряда на фотопроводимость. Оптическая перезарядка локальных уровней и связанные с ней эффекты. Термостимулированная проводимость. Фоторазогрев носителей заряда. Фотоэлектромагнитный эффект).										
Тема 11. 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.	8	4					4	4		4

Правило Урбаха. Нестационарные процессы. Определение дрейфовой подвижности по измерениям времени пролета. Дисперсионный перенос. Влияние внешних воздействий на свойства некристаллических полупроводников. Метастабильные состояния).										
Тема 12. 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. 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	8	4					4	4		4

Штарка. Электрические и гальваномагнитные явления в двумерных структурах. Эффект Шубникова-де Гааза. Квантовый эффекте Холла).										
Тема 13. Принципы действия полупроводниковых приборов (Приборы с использованием р-п 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	8	4					4	4		4

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).										
Промежуточная аттестация: допуск к кандидатскому экзамену	6					6	6			
Итого	108	48				6	54	54		54

8. Образовательные технологии

Используемые формы и методы обучения: лекции и семинарские занятия, самостоятельная работа аспирантов.

В процессе преподавания дисциплины преподаватель использует как классические формы и методы обучения (лекции и семинарские занятия), так и активные методы обучения.

При проведении лекционных занятий преподаватель использует при необходимости аудиовизуальные, компьютерные и мультимедийные средства обучения, а также демонстрационные и наглядно-иллюстрационные (в том числе раздаточные) материалы.

9. Учебно-методические материалы для самостоятельной работы по дисциплине (модулю): аспирантам предоставляется программа курса, план занятий и задания для самостоятельной работы, презентации к лекционным занятиям.

10. Ресурсное обеспечение:

Основная литература:

1. П.Ю. М. Кардона «Введение в физику полупроводников», М.: Физматлит, 2002.
2. Г.Г. Зегря, В.И. Перель «Основы физики полупроводников», М.: Физматлит, 2009.
3. А.И. Лебедев «Физика полупроводниковых приборов», М.: Физматлит, 2008.
4. П.С. Киреев «Физика полупроводников». М.: Высшая школа, 1975.
5. К.В. Шалимова «Физика полупроводников». М.: Энергоатомиздат, 1985.
6. С.З «Физика полупроводниковых приборов». М.: Мир, 1984.
7. Ю.И. Уханов «Оптические свойства полупроводников» М.: Наука, 1977.
8. В.Л. Бонч-Бруевич, И.П. Звягин, И.В. Карпенко, А.Г. Миронов. «Сборник задач по физике полупроводников». М.: Наука, 1987.

Дополнительная литература:

1. Р. Смит «Полупроводники», М.: Мир, 1982.
2. К. Зеегер «Физика полупроводников», М.: Мир, 1977.
3. А.И. Ансельм «Введение в теорию полупроводников», М.: Наука, 1962.
4. Дж. Блекмор «Статистика электронов в полупроводниках», М.: Мир, 1964.
5. А. Роуз «Основы теории фотопроводимости», М.: Мир, 1966.
6. М. Херман «Полупроводниковые сверхрешетки», М.: Мир, 1989.
7. 4. В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников. «Физика полупроводников». М.: Наука, 1979 г.
8. 5. Дж. Займан «Принципы теории твердого тела». М: Мир, 1974.
9. Н. Мотт, Э. Дэвис «Электронные процессы в некристаллических веществах» М.: Мир, 1974.

11. Язык преподавания – русский.

12. Преподаватели:

Д.ф.-м.н., профессор Форш Павел Анатольевич, e-mail: phorsh@mail.ru.

Фонды оценочных средств, необходимые для оценки результатов обучения

Образцы домашних заданий:

1. Вычислить подвижность, которой обладает электрон в образце германия n-типа, если удельное сопротивление германия $\rho=0,1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, а концентрация электронов в нем $n=10^{17} \text{ см}^{-3}$.
2. Вычислить электропроводность германия, содержащего $N_1=10^{17} \text{ см}^{-3}$ атомов мышьяка и $N_2=5\cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ атомов галлия.
3. Пластина полупроводника n-типа, квадратного сечения с шириной $a=1 \text{ мм}$ помещена в магнитное поле. Ток, проходящий через пластину, равен $I=50 \text{ мА}$. Величина образовавшейся разности потенциалов Холла составляет $U=10 \text{ мВ}$. Определить индукцию магнитного поля, если концентрация носителей заряда $n=10^{16} \text{ см}^{-3}$.
4. Сколько электронов и дырок образуется в маленьком кристалле ВаО при поглощении им световой энергии $W=10^{-11} \text{ Дж}$ с длиной волны $\lambda=200 \text{ нм}$? На каком характерном расстоянии происходит основное поглощение световой энергии, если коэффициент поглощения $\alpha=3\cdot 10^9 \text{ см}^{-1}$.
5. У кремния ширина запрещенной зоны равна примерно 1.2 эВ , а у германия – 0.75 эВ (при $T=0 \text{ К}$). Для каких длин волн эти кристаллы непрозрачны?
6. Как изменится концентрация электронов в собственном полупроводнике в невырожденном случае при уменьшении температуры от 300 К до 100 К . Считать, что ширина запрещенной зоны равна $1,1 \text{ эВ}$. Зависимостью ширины запрещенной зоны от температуры пренебречь.
7. Определите зависимость уровня Ферми от температуры в невырожденном полупроводнике, содержащем один тип одновалентных акцепторов с концентрацией N_a .
8. Вычислите эффективное число состояний для двумерной системы с квадратичным законом дисперсии.
9. Получите выражение для эффективной плотности состояний в валентной зоне для тяжелых и легких дырок.
10. Определите закон изменения концентрации носителей заряда от времени в материале p-типа, если после выключения источника межзонной генерации неравновесных носителей заряда темп рекомбинации $R=a(np-n_0p_0)$, где $a=\text{const}$, n , p – неравновесные концентрации электронов и дырок соответственно, n_0 , p_0 – равновесные концентрации электронов и дырок соответственно.

Вопросы для промежуточной аттестации – зачета:

1. Отличительные черты полупроводников. Примеры полупроводников.
2. Оптические переходы в неупорядоченных полупроводниках.
3. Энергетический спектр сверхрешеток. Классификация полупроводниковых сверхрешеток.
4. Проводимость неупорядоченных полупроводников.
5. Потенциальные барьеры. Плотность тока. Соотношение Эйнштейна.
6. Качественные представления об электронном спектре в неупорядоченных полупроводниках.
7. Общие особенности неупорядоченных систем.
8. Квазиимпульс и зона Бриллюэна. Понятие об энергетических зонах.
9. Центры прилипания и центры рекомбинации. Демаркационные уровни.
10. Основные различия между металлами, полупроводниками и диэлектриками с точки зрения зонной теории.
11. Статистика Шокли-Рида-Холла.

12. Рекомбинация через примеси и дефекты. Времена жизни в случае рекомбинации через примесный уровень.
13. Понятие об эффективной массе. Тензор обратных эффективных масс.
14. Коэффициент межзонной рекомбинации. Время жизни при межзонной рекомбинации.
15. Статистика электронов и дырок в компенсированных полупроводниках.
16. Длина экранирования. Истощенный контактный слой. Обогащенный контактный слой.
17. Экранирование электрического поля в 2 D-системах.
18. Вырождение зон и гофрировка изоэнергетических поверхностей вблизи потолка валентной зоны.
19. Плотность состояний в системах пониженной размерности. Вычисление положения уровня Ферми в 2 D-системах.
20. Применение метода эффективной массы для нахождения энергетического спектра полупроводниковых систем пониженной размерности.
21. Энергетический спектр мелких примесных состояний в полупроводниковых квантовых ямах.
22. Квазиравновесие и квазиуровни Ферми.
23. Выпрямление в контакте металл-полупроводник. p-n переход. Статическая вольтамперная характеристика p-n перехода.
24. Туннельный эффект в p-n переходах. Туннельный диод.
25. Метод слабо связанных (почти свободных) электронов. Обсуждение особенностей электронного энергетического спектра на основе метода слабо связанных электронов.
26. Эффективная масса плотности состояний.
27. Статистика заполнения примесных уровней. Простые центры.
28. Биполярный транзистор.
29. Экситоны в квантовых ямах, квантово-размерный эффект Штарка.
30. Эффект Шубникова-де Гааза.
31. Квантовый эффект Холла.
32. Энергетическая диаграмма структуры металл-диэлектрик-полупроводник (МДП). Полевые транзисторы на МДП-структурах.
33. Приборы с зарядовой связью.
34. Шумы в полупроводниковых приборах.
35. Фотоэлементы и фотодиоды. Спектральная чувствительность и обнаружительная способность.
36. Полупроводниковые детекторы ядерных излучений.
37. Светодиоды и полупроводниковые лазеры. Инжекционные лазеры на основе двойной гетероструктуры.
38. Использование наноструктур в полупроводниковых приборах. Гетеротранзистор с двумерным электронным газом (НЕМТ). Гетеролазеры на основе структур с квантовыми ямами и квантовыми точками.
39. Резонансное туннелирование в двухбарьерной гетероструктуре и резонансно-туннельный диод.
40. Комплексная диэлектрическая проницаемость, показатель преломления, коэффициент отражения, коэффициент поглощения. Связь между ними и соотношения Крамерса-Кронига.

**Методические материалы
для проведения процедур оценивания результатов обучения**

Зачет проходит по билетам, каждый из которых включает 3 вопроса. Уровень знаний аспиранта по каждому вопросу оценивается на «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно». В случае если на все вопросы был дан ответ, оцененный не ниже чем «удовлетворительно», аспирант получает общую оценку «зачтено».

Шкала оценивания знаний, умений и навыков

Результат освоения дисциплины	Критерии оценивания знаний, умений и навыков			
	2/ не зачтено	3/ зачтено	4/ зачтено	5/ зачтено
Знания	Отсутствие знаний основных законов физики полупроводников	В целом успешные, но не систематические знания основных законов физики полупроводников	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы знание основных законов физики полупроводников	Успешные и систематические знания основных законов физики полупроводников
Умения	Отсутствие умения применять знания основных законов физики полупроводников для решения научных задач	В целом успешное, но не систематическое умение применять знания основных законов физики полупроводников для решения научных задач	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение применять знания основных законов физики полупроводников для решения научных задач	Успешное и систематическое умение применять знания основных законов физики полупроводников для решения научных задач
Навыки	Отсутствие/фрагментарное владение навыками решения научных задач в области физики полупроводников	В целом успешное, но не систематическое владение навыками решения научных задач в области физики полупроводников	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы владение навыками решения научных задач в области физики полупроводников	Успешное и систематическое владение навыками решения научных задач в области физики полупроводников