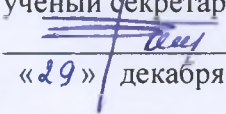


МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт автоматики и процессов управления  
Дальневосточного отделения Российской академии наук  
(ИАПУ ДВО РАН)

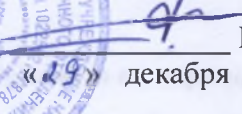
«СОГЛАСОВАНО»

Заместитель директора по научно-образовательной деятельности,  
ученый секретарь, к.т.н., доцент

 С.Б. Змеу  
«29» декабря 2021 г.

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ИАПУ ДВО РАН  
член-корреспондент РАН

 Р.В. Ромашко  
«29» декабря 2021 г.



**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ (РПУД)**

**Физика полупроводников**

Группа научных специальностей 1.3. – «Физические науки»,  
научная специальность 1.3.11 «Физика полупроводников»  
Основная образовательная программа «Физика полупроводников»

**Форма подготовки (очная)**

Междисциплинарная кафедра подготовки кадров высшей квалификации (МК ПКВК) ИАПУ  
ДВО РАН

курс 2 семестр 3,4  
лекции 60 час. / 1,67 з.е.  
практические занятия – 52 час. / 1,44 з.е.  
лабораторные работы 18 час. / 0,5 з.е.  
всего часов аудиторной нагрузки 130 (час.) / 3,61 з.е.  
самостоятельная работа 52 (час.) / 1,44 з.е.  
контрольные работы нет  
курсовая работа / курсовой проект не предусмотрены.  
зачет 3 семестр  
экзамен 4 семестр

Рабочая программа составлена в соответствии с федеральными государственными требованиями к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре, условиям их реализации и срокам освоения этих программ с учетом различных форм обучения, образовательных технологий и особенностей отдельных категорий обучающихся, утвержденными приказом Министерства науки и высшего образования РФ от 20 октября 2021 № 951.

Рабочая программа обсуждена на заседании МК ПКВК ИАПУ ДВО РАН, протокол № 3 от «17» ноября 2021 г.

Заведующий кафедрой: д-р физ.- мат. наук, профессор Н.Г. Галкин  
Составитель (ли): д-р физ.- мат. наук, профессор, Н.Г. Галкин.

**Оборотная сторона титульного листа РПУД**

**I. Рабочая программа пересмотрена на заседании кафедры:**

Протокол от « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. № \_\_\_\_\_

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_  
(подпись) (И.О. Фамилия)

**II. Рабочая программа пересмотрена на заседании кафедры:**

Протокол от « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. № \_\_\_\_\_

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_  
(подпись) (И.О. Фамилия)

## АННОТАЦИЯ

Дисциплина «Физика полупроводников и низкоразмерных структур» предназначена для аспирантов, обучающихся по основной образовательной программе «Физика полупроводников» и входит в число дисциплин по вариативной части учебного плана.

При разработке рабочей программы учебной дисциплины использованы федеральные государственные требования к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (уровень подготовки кадров высшей квалификации) по группе научных специальностей 1.3. – «Физические науки» и научной специальности 1.3.11 – «Физика полупроводников» и учебный план подготовки аспирантов по научной специальности «Физика полупроводников».

**Цель** Основная цель изучения дисциплины – подготовка к сдаче кандидатского минимума по физике полупроводников.

### **Задачи:**

1. Способствовать освоению аспирантами основных разделов курса «Физика полупроводников», необходимых для дальнейшей успешной научной деятельности.
2. Формирование компетенций, соответствующих профилю подготовки по научной специальности «Физика полупроводников»

**Компетенции выпускника, формируемые в результате изучения дисциплины.**

### **Универсальные компетенции:**

- УК-1. Способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении

исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях,

Общепрофессиональные компетенции:

- ОПК-1. Способностью самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в области физики полупроводников с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий

Профессиональные компетенции:

- ПК-1. Способность строить новейшие физические и математические модели приборов, схем, устройств нанoeлектроники различного функционального назначения, а также использовать стандартные программные средства их компьютерного моделирования

- ПК-2. Способность аргументированно выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик низкоразмерных структур, в том числе различного функционального назначения

**Требования к уровню усвоения содержания дисциплины.**

Аспиранты должны приобрести следующие знания и умения:

-знать:

- основные методы создания полупроводниковых структур в сверхвысоком вакууме
- основные типы лабораторных установок (оборудования) для экспериментального исследования процессов формирования полупроводниковых структур
- основные методы исследования физических свойств полупроводниковых структур

- методы исследования функциональных характеристик полупроводниковых структур
- современное состояние науки в выбранной области физики полупроводников
- современные способы использования информационно-коммуникационных технологий в области физики полупроводников.

Уметь:

- выбирать модели, необходимые для описания физических процессов, протекающих при создании полупроводниковых структур
- критически оценивать область применимости выбранных моделей для описания протекающих при создании полупроводниковых структур физических процессов
- обосновано выбирать методы формирования полупроводниковых структур с заданными параметрами
- использовать современное лабораторное оборудование для проведения эксперимента
- выбирать и применять методы исследования физических свойств полупроводниковых структур
- выбирать и применять методы исследования функциональных характеристик полупроводниковых структур
- рационально организовывать научную работу в выбранной области физики полупроводников
- представлять результаты научной работы
- готовить заявки на получение научных грантов и заключения контрактов по НИР в выбранной области физики полупроводников.

- **СОДЕРЖАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КУРСА (60 часов)**

- 1. Химическая связь и атомная структура полупроводников (6 часов)**

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..

- 2. Основы зонной теории полупроводников (6 часов)**

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.

### **3. Равновесная статистика электронов и дырок в полупроводниках (6 часов)**

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.

### **4. Кинетические явления в полупроводниках (6 часов)**

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.

### **5. Рекомбинация электронов и дырок в полупроводниках (6 часов)**

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

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 Погкельса. Эффект Бурштейна-Мосса. Эффекты Фарадея и Фойгта. Примесная и собственная фотопроводимость. Влияние прилипания неравновесных носителей заряда на фотопроводимость.

#### **9. Некристаллические полупроводники (6 часов)**

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.

#### **10. Полупроводниковые структуры пониженной размерности и сверхрешетки (10 часов)**

Шкалы длин в современной физике твердого тела. Размерность. Размерное квантование. Транспорт носителей при различных



размерностях полупроводниковых структур. Оптические свойства в системах с пониженной размерностью. Теоретическое описание электронных состояний в двумерном электронном газе. Эксперименты по электрическому транспорту и их интерпретация. Электрические и гальваномагнитные явления в двумерных структурах. Эффект Шубникова-де Гааза. Общее представление о квантовом эффекте Холла. Оптические свойства. Практическая реализация систем с двумерным электронным газом. Методы генерации горячих носителей: роль гетеропереходов. Электронная спектроскопия горячих электронов: транспортные и оптические методы исследования. Структуры с переносом носителей в сильных электрических полях. Туннелирование через одиночный барьер. Туннелирование через двойной барьер с квантовой ямой. Множественные туннельные барьеры. Электронная структура идеальной сверхрешетки. Контра- и ковариантные композиционные сверхрешетки, легированные сверхрешетки. Оптические свойства сверхрешеток (межзонное поглощение и излучательная рекомбинация). Экситоны в квантовых ямах. Блоховские осцилляции и лестницы Штарка. Измерения электрического транспорта в сверхрешетках. Применения сверхрешеток.

- **СОДЕРЖАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА (18 часов)**

1. Эффект Холла в низкоразмерных структурах при больших магнитных полях (1-8 Тл) и в диапазоне температур 5-300 К. Определение концентрации, подвижности и знака носителей заряда, механизмов рассеяния носителей (6 часов).

2. Определение ширины запрещенной зоны полупроводников из данных спектральной зависимости коэффициента поглощения по температурной зависимости электропроводности (6 часов).
3. Исследование фотоэлектрических и электролюминесцентных свойств фотодиодных и светодиодных структур с пониженной размерностью (6 часов).

• **СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИКУМОВ (52 часа)**

1. Химическая связь и атомная структура полупроводников (5 часов)
2. Основы зонной теории полупроводников (5 часов)
3. Равновесная статистика электронов и дырок в полупроводниках (5 часов)
4. Кинетические явления в полупроводниках (5 часов)
5. Рекомбинация электронов и дырок в полупроводниках (5 часов)
6. Контактные явления в полупроводниках (5 часов)
7. Свойства поверхности полупроводников (5 часов)
8. Оптические явления в полупроводниках (5 часов)
9. Некристаллические полупроводники (5 часов)
10. Полупроводниковые структуры пониженной размерности и сверхрешетки (7 часов)

• **САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА АСПИРАНТОВ (52 ЧАСА)**

1. Знакомство с научными периодическими изданиями по методам роста и исследования свойств полупроводниковых нано- и гетероструктур.
2. Овладение методикой работы на оптическом спектральном оборудовании в широком диапазоне длин волн, включая Фурье-спектроскопию, и широком диапазоне температур от 10 до 300 К.

3. Овладение методикой работы на установке по исследованию Холл-эффекта в области магнитных полей до 8 Тл и температурном диапазоне от 1.5 К до 300 К.
4. Изучение методик обработки оптических, электрических, фотоэлектрических и люминесцентных данных.
5. Подготовка отчетов по лабораторным работам.

## **КОНТРОЛЬ ДОСТИЖЕНИЯ ЦЕЛЕЙ КУРСА**

### **Вопросы к зачету (1-20) и экзамену (21-49):**

1. Кристаллические и аморфные тела. Трансляционная симметрия. Элементарная ячейка. Решетка Браве. Точечные и пространственные группы.
2. Особенности распространения волн в периодических структурах. Закон Брегга.
3. Обратная решетка. Зоны Бриллюэна.
4. Точечные дефекты, их образование и диффузия. Вакансии. Атомы внедрения. Комбинации атомных дефектов.
5. Краевые и винтовые дислокации. Вектор Бюргерса. Энергия дислокаций. Переползание и скольжение. Размножение дислокаций.
6. Описание энергетического состояния кристалла при помощи газа квазичастиц. Фотоны, магноны, экситоны, плазмоны и др. Электроны в металле как квазичастицы. Квазиимпульс. Закон дисперсии.
7. Теорема Блоха. Граничные условия. Плотность состояний. Статистика газа квазичастиц. Бозоны и фермионы. Взаимодействие частиц.
8. Колебание решетки – фононы. Теплоемкость решетки. Ангармонизм и тепловое расширение.

9. Одноэлектронная модель. Приближение сильной и слабой связи. Зонная схема и типы твердых тел.
10. Вырожденный электронный газ. Электронная теплоемкость, поверхности Ферми. Электроны и дырки. Циклотронная масса.
11. Времена релаксации. Механизмы рассеяния электронов. Рассеяние на примесях и дефекты.
12. Электрон-фононные столкновения. Нормальные процессы и процессы переброса. Магнитосопротивление и эффект Холла.
13. Электронная структура типичных полупроводников. Кремний. Узкозонные полупроводники. Примесные уровни. Доноры и акцепторы. Температурная зависимость проводимости.
14. Р-п переходы. Фотопроводимость. Рекомбинация и релаксация неравновесных носителей. Горячие носители. Эффект Ганна.
15. Зависимость ширины запрещенной зоны от типа химической связи. Примеры изоэлектронного ряда полупроводников (строка в таблице Менделеева). Задачи.
16. Зависимость ширины запрещенной зоны от порядкового номера  $Z$  элемента, входящего в состав полупроводников (столбец в таблице Менделеева). Задачи.
17. Диффузия носителей заряда в полупроводнике. Определение. Диффузионный ток дырок, одномерный и трехмерный случай. Диффузионный ток электронов. Диффузионная длина. Время жизни.
18. Дрейф носителей заряда. Определение. Подвижность. Дрейфовый ток дырок, электронов.
19. Полный ток в полупроводнике (формула).
20. Уравнение непрерывности для дырок, для электронов. Одномерный и трехмерный случаи. Стационарное состояние.

21. Зависимость  $E(k)$  для простой кубической решетки. Общие свойства функции  $E(k)$ . Период функции  $E(k)$ . Зоны Бриллюэна.
22. Эффективная масса электронов и дырок. Зависимость энергии электрона от квазиимпульса вблизи краев зон.
23. Водородоподобная модель примесного центра.
24. Функции Ферми-Дирака. Уровень Ферми.
25. Плотность состояний в свободной и валентной зонах. Концентрация электронов и дырок в полупроводнике.
26. Невырожденный полупроводник. Вырожденный полупроводник. Положение уровня Ферми, формулы для Концентрации носителей заряда.
27. Собственный невырожденный полупроводник. Зависимость уровня Ферми и концентрации носителей от температуры. Собственный вырожденный полупроводник.
28. Концентрация неосновных носителей в полупроводнике. Закон «действующих масс» для невырожденного полупроводника.
29. Контактная разность потенциалов. Ее происхождение, величина, способ измерения.
30. Двойной заряженный слой на контакте двух кристаллов. Толщина заряженных слоев в металле и в полупроводнике (оценка).
31. Контакт металла и полупроводника N-типа, два случая. Проводимость приконтактного слоя полупроводника.
32. Контакт металла и полупроводника P-типа, два случая. Запорный и антизапорный слои.
33. Электрическое поле в P-N переходе. Зависимость напряженности и потенциала от координаты. Изгиб энергетических уровней свободной и валентной зон.
34. Толщина заряженных слоев в P-N переходе. Толщина P-N перехода.

35. Гетеропереход. Зонная диаграмма. Основное отличие гетероперехода от гомоперехода.
36. Шкалы длин в современной физике твердого тела. Размерность. Размерное квантование.
37. Транспорт носителей при различных размерностях полупроводниковых структур. Оптические свойства в системах с пониженной размерностью.
38. Теоретическое описание электронных состояний в двумерном электронном газе. Эксперименты по электрическому транспорту и их интерпретация.
39. Электрические и гальваномагнитные явления в двумерных структурах. Эффект Шубникова-де Гааза.
40. Общее представление о квантовом эффекте Холла (целочисленном и дробном).
41. Оптические свойства. Практическая реализация систем с двумерным электронным газом.
42. Методы генерации горячих носителей: роль гетеропереходов.
43. Электронная спектроскопия горячих электронов: транспортные и оптические методы исследования.
44. Структуры с переносом носителей в сильных электрических полях
45. . Туннелирование через одиночный барьер. Туннелирование через двойной барьер с квантовой ямой.
46. Множественные туннельные барьеры. Электронная структура идеальной сверхрешетки.
47. Контра- и ковариантные композиционные сверхрешетки, легированные сверхрешетки. Оптические свойства сверхрешеток (межзонное поглощение и излучательная рекомбинация).

48. Экситоны в квантовых ямах. Блоховские осцилляции и лестницы Штарка.

49. Измерения электрического транспорта в сверхрешетках. Применения сверхрешеток.

## • УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### Основная литература

1. Шалимова К.В. Физика полупроводников. Учебник. 4-е изд., стер. - СПб.: Издательство «Лань», 2010. - 400 с.
2. Яценко О.Б., Чудотворцев И.Г., Шаров М.К. Основы физики и химии полупроводников: Учебное пособие. Ч.2. - Воронеж: ИПЦ ВГУ, 2007. - 50 с. <http://window.edu.ru/resource/282/59282>
3. Плотников В.П. Физика проводников и диэлектриков. Учебное пособие. - Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2004. - 80 с. <http://window.edu.ru/resource/782/21782>
4. Бормонтов Е.Н., Хухрянский М.Ю. Статистика электронов и дырок в полупроводниках: Учебное пособие по лекционному курсу "Физика полупроводников". - Воронеж: Изд-во ВГУ, 2003. - 31 с. <http://window.edu.ru/resource/207/27207>
5. Зегря Г.Г. Основы физики полупроводников [*Электронный ресурс*]: учебное пособие/ Зегря Г.Г., Перель В.И.— Электрон. текстовые данные.— М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009.— 336 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/12941>. — ЭБС «IPRbooks».
6. Румянцев А.В. Введение в физику конденсированного состояния вещества [*Электронный ресурс*]: учебное пособие/ Румянцев А.В.— Электрон. текстовые данные.— Калининград: Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта, 2012.— 119 с.—

Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/23770> .— ЭБС «IPRbooks».

7. Горшков А.П., Тихов С.В. Физика Поверхности Полупроводников. Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского. Учебное пособие, 2013 – 101 с.
8. Алешкин В.Я. Современная физика полупроводников: курс лекций. Н. Новгород: ННГУ, 2011. - 88 с.

#### Дополнительная литература

1. Квантовый эффект Холла. Под ред. Р. Пренджа и С. Гирвина. М.: Мир, 1989. – 404 с.
2. Лебедев А.И. Физика полупроводниковых приборов [Электронный ресурс]/ Лебедев А.И.— Электрон. текстовые данные.— М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008.— 488 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/12950>. — ЭБС «IPRbooks».
3. Заводинский В.Г. Компьютерное моделирование наночастиц и наносистем. М.: Физматлит, 2013. – 175 с.
4. Павлов Л.П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов. М.: Высшая школа, 1987, 239с.
5. Бормонтов Е.Н., Быкадорова Г.В., Гаврилов А.Е. Моделирование зонной структуры полупроводников: Учебное пособие по лекционному курсу "Физика полупроводников". - Воронеж: Изд-во ВГУ, 2003. - 33 с. <http://window.edu.ru/resource/241/40241>
6. Перлин Е.Ю., Вартамян Т.А., Федоров А.В. Физика твердого тела. Оптика полупроводников, диэлектриков, металлов: Учебное пособие. - СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. - 216 с. <http://window.edu.ru/resource/408/54408>
7. Федоров А.В. Физика и технология гетероструктур, оптика квантовых наноструктур: Учебное пособие. - СПб: СПбГУ ИТМО,



2009. - 195 с. <http://window.edu.ru/resource/740/63740>

8. Дубровский В.Г. Теоретические основы технологии полупроводниковых наноструктур: Учебное пособие. - СПб.: СПбГПУ, 2006. - 347 с. <http://window.edu.ru/resource/346/63346>
9. Борисенко С.И. Физика полупроводниковых наноструктур: учебное пособие. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. - 115 с. <http://window.edu.ru/resource/927/73927>
10. Басс Ф.Г., Булгаков А.А., Тетервов А.П. Высокочастотные свойства полупроводников со сверхрешетками. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. - 288 с.
11. Шик А.Я. Двумерные электронные системы. Учебное пособие. СПб, СПбГТУ, 1993. - 76 с.
12. Питер Ю., Кардона М. Основы физики полупроводников. 3-е изд., испр. и доп. - М.: Физматлит, 2002. - 560 с.
13. Херман М. Полупроводниковые сверхрешетки. М.: Мир 1989 г. 240 с.