

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное**  
**учреждение высшего образования**  
**«Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова»**

Базовая кафедра нанотехнологий в электронике  
ФГБОУ ВО "ЯрГУ им. П.Г. Демидова" в ЯФ ФТИАН РАН

УТВЕРЖДАЮ

Декан физического факультета  
  
(подпись) И.С. Огнев

23 мая 2023 года

**Рабочая программа дисциплины**

**Избранные главы физики полупроводников II**

программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре

по научной специальности 1.3.11 Физика полупроводников

Форма обучения очная

Программа одобрена на заседании  
Базовой кафедры нанотехнологий в электронике  
ФГБОУ ВО "ЯрГУ им. П.Г. Демидова" в ЯФ ФТИАН РАН  
от «30» марта 2023 года, протокол № 8

Ярославль

## **1. Цели освоения дисциплины**

Целями освоения дисциплины «Избранные главы физики полупроводников – II» являются:

- усвоение аспирантами знаний о физике кинетических явлений в полупроводниках, об использовании явлений переноса в полупроводниковых приборах нового поколения;
- изучение модельных представлений и основных теоретических принципов, описывающих кинетические свойства полупроводниковых кристаллов и пленок полупроводниковых материалов;
- формирование у аспирантов навыков экспериментального изучения явлений переноса в полупроводниковых системах.

## **2. Место дисциплины в структуре программы аспирантуры**

«Избранные главы физики полупроводников – II» является дисциплиной по выбору. Данная дисциплина рассматривает контактные явления, происходящие на границе полупроводника и других материалов. Данная дисциплина имеет логические и содержательно-методические взаимосвязи с другими частями ООП, а именно с обязательной дисциплиной «Специальность», курсами по выбору (Избранные главы физики полупроводников – I) и педагогической практикой.

Для изучения данной дисциплины необходимы «входные» знания, умения, полученные в процессе обучения по программам специалитета или бакалавриата – магистратуры

## **3. Планируемые результаты освоения дисциплины: -**

В результате освоения дисциплины аспирант должен:

### **Знать:**

- основные понятия и закономерности физической кинетики полупроводников;
- физические основы методов диагностики полупроводниковых тонкопленочных материалов и структур и границы их применимости.

### **Уметь:**

- применять полученные знания для анализа параметров полупроводниковых структур и приборов на их основе;
- оперировать физическими и технологическими терминами и величинами;
- формулировать задачи по исследованию переноса носителей заряда в однородных и барьерных системах различной природы;
- использовать физические законы и закономерности для моделирования физических параметров тонкопленочных полупроводниковых структур.

### **Владеть:**

- методами экспериментального исследования полупроводниковых материалов и структур;
- современными компьютерными технологиями для анализа и обработки экспериментальных данных;
- практическими приемами при самостоятельной работе с полупроводниковыми материалами и структурами
- методами расчета и оптимизации современных полупроводниковых приборов и структур.

## **4. Объем, структура и содержание дисциплины**

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 зачетных единицы, 108 акад. часов.

№ п/п	Темы (разделы) дисциплины, их содержание	Семестр	Виды учебных занятий и их трудоемкость (в академических часах)					Формы текущего контроля успеваемости
			лекции	практические	лабораторные	консультации	самостоятельная работа	Форма промежуточной аттестации
1	Контакт металл-полупроводник	2	1				10	реферат
2	Контактные явления на границе раздела металл-полупроводник	2	1	1			10	реферат
3	Электронно-дырочные переходы	2	1	1			10	реферат
4	Диодная теория выпрямления. Основные допущения		1	1			14	Контрольная работа №1
5	Гетеропереходы		1				12	реферат
6	Переходные процессы в полупроводниковых диодах		1	1			14	реферат
7	Структуры металл-диэлектрик-полупроводник		1	1			14	Контрольная работа №2
8	Применение контактных явлений		1	1		2	10	реферат
								Зачет
	<b>Всего за 2 семестр 108 час</b>	<b>2</b>	<b>8</b>	<b>6</b>		<b>2</b>	<b>92</b>	

### Содержание разделов дисциплины:

#### 1. Контакт металл-полупроводник

Предмет, цели и задачи курса. Основная терминология. Контакт металл-полупроводник. Запорный и антизапорный слой. Распределение потенциала в запорном слое. Ширина запорного слоя. Емкость запорного слоя Шоттки.

#### 2. Контактные явления на границе раздела металл-полупроводник

Диодная теория выпрямления запорного слоя Шоттки. Диффузионная теория выпрямления. Влияние сил изображения. Вольт-амперная характеристика диода с барьером Шоттки при наличии туннелирования. Способы создания омических контактов к полупроводникам.

#### 3. Электронно-дырочные переходы

Электронно-дырочные переходы. Образование перехода, контактная разность потенциалов. Распределение потенциала для резкого и плавного перехода. Емкость перехода. Влияние центров с глубокими уровнями на емкость.

#### **4. Диодная теория выпрямления. Основные допущения**

Вольт-амперная характеристика. Диод с тонкой базой. Вольт-амперная характеристика p-i-n диода. Влияние генерации и рекомбинации носителей на вид вольт-амперной характеристики.

#### **5. Гетеропереходы**

Гетеропереходы. Классификация гетеропереходов. Энергетические диаграммы гетеропереходов. Распределение потенциала. Емкость гетеропереходов. Вольт-амперные характеристики гетеропереходов для анизотипных и изотипных случаев.

#### **6. Переходные процессы в полупроводниковых диодах**

Переходные процессы в полупроводниковых диодах. Определение и классификация переходных процессов. Переходный процесс при переключении диода из нейтрального в пропускное состояние. Переходный процесс при переключении диода из пропускного состояния в запирающее.

#### **7. Структуры металл-диэлектрик-полупроводник**

Электронные процессы в структурах металл-диэлектрик-полупроводник. Энергетические диаграммы идеальных МДП-структур. Концентрация носителей заряда в структуре. Вольт-фарадные характеристики МДП-структур для различных частот.

#### **8. Применение контактных явлений**

Общая классификация приборов на основе контактных явлений. Области применения различных видов контактов.

### **5. Образовательные технологии, в том числе технологии электронного обучения и дистанционные образовательные технологии, используемые при осуществлении образовательного процесса по дисциплине**

В процессе обучения используются следующие образовательные технологии:

**Вводная лекция** – дает первое целостное представление о дисциплине и ориентирует студента в системе изучения данной дисциплины. Дается краткий обзор курса, история развития науки и практики, достижения в этой сфере, имена известных ученых, излагаются перспективные направления исследований. На этой лекции высказываются методические и организационные особенности работы в рамках данной дисциплины, а также дается анализ рекомендуемой литературы.

**Академическая лекция с элементами лекции-беседы** – последовательное изложение материала, осуществляемое преимущественно в виде монолога преподавателя. Элементы лекции-беседы обеспечивают контакт преподавателя с аудиторией, что позволяет привлекать внимание аспирантов к наиболее важным темам дисциплины, активно вовлекать их в учебный процесс, контролировать темп изложения учебного материала в зависимости от уровня его восприятия.

**Проблемная лекция** – изложение материала, предполагающее постановку проблемных и дискуссионных вопросов, освещение различных научных подходов, связанные с различными моделями интерпретации изучаемого материала. Проблемная лекция начинается с вопросов, с постановки проблемы, которую в ходе изложения материала необходимо решить. В лекции сочетаются проблемные и информационные начала. При этом процесс познания аспирантом в сотрудничестве и диалоге с преподавателем приближается к поисковой, исследовательской деятельности.

**Практическое занятие** – занятие, посвященное освоению конкретных умений и навыков по закреплению полученных на лекции знаний.

**Консультации** – вид учебных занятий, являющийся одной из форм контроля самостоятельной работы аспирантов. На консультациях по просьбе аспирантов рассматриваются наиболее сложные разделы дисциплины, преподаватель отвечает на вопросы аспирантов, которые возникают у них в процессе самостоятельной работы.

В процессе обучения используются следующие технологии электронного обучения и дистанционные образовательные технологии:

**Электронный учебный курс «Теоретическая физика» в LMS Электронный университет Moodle ЯрГУ**, в котором:

- представлены задания для самостоятельной работы аспирантов по темам дисциплины;
- представлен список литературы, рекомендуемой для освоения дисциплины;
- представлена информация о форме и времени проведения консультаций по дисциплине в случае их проведения в дистанционном формате в режиме онлайн.

## **6. Перечень основной и дополнительной литературы, ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» (при необходимости), рекомендуемых для освоения дисциплины**

### **а) основная литература**

1. Зегря, Г.Г. Основы физики полупроводников./ Г.Г. Зегря, В.И. Перель. М.: Физматлит, 2009. 336 с.
2. Киреев П. С. Физика полупроводников: учеб. пособие для вузов. / П. С. Киреев; М-во высш. и сред. спец. образования СССР - 2-е изд., доп. - М.: Высшая школа, 1975. - 584 с.

### **б) дополнительная литература**

1. Бонч-Бруевич, В.Л. Физика полупроводников. // В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников - М.: ГРФМЛ, Наука. – 1977. - 672 с.
2. Викулин, И.М., Физика полупроводниковых приборов./ И.М. Викулин, В.И. Стафеев -М.: Радио и связь, 1990, 264 с.
3. Зи, С. Физика полупроводниковых приборов. В 2-х книгах. Кн.1./С.Зи – М.: Мир, 1984, 456 с.

### **в) ресурсы сети «Интернет» (при необходимости)**

Автоматизированная библиотечно-информационная система «БУКИ-NEXT»  
[http://www.lib.uniyl.ac.ru/opac/bk\\_cat\\_find.php](http://www.lib.uniyl.ac.ru/opac/bk_cat_find.php)

## **7. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине**

Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине включает в свой состав следующие помещения:

- учебные аудитории для проведения лекций;
- учебные аудитории для проведения практических занятий;
- учебные аудитории для проведения групповых и индивидуальных консультаций,
- учебные аудитории для проведения промежуточной аттестации;
- помещения для самостоятельной работы.

Помещения для самостоятельной работы оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду ЯрГУ.

Автор(ы) :

Заведующий Базовой кафедрой нанотехнологий в электронике  
ФГБОУ ВО "ЯрГУ им. П.Г. Демидова" в ЯФ ФТИАН РАН  
Профессор, доктор физико-математических наук

А.С. Рудый

**Приложение №1 к рабочей программе дисциплины  
«Избранные главы физики полупроводников – I»**

**Оценочные материалы  
для проведения текущей и/или промежуточной аттестации  
аспирантов по дисциплине**

**1. Список вопросов и (или) заданий для проведения промежуточной аттестации**

***Список вопросов к зачету:***

1. Контакт металл-полупроводник. Запорный и антизапорный слой.
2. Распределение потенциала в запорном слое.
3. Ширина запорного слоя. Емкость запорного слоя Шоттки.
4. Диодная теория выпрямления запорного слоя Шоттки.
5. Диффузионная теория выпрямления.
6. Влияние сил изображения.
7. Вольт-амперная характеристика диода с барьером Шоттки при наличии туннелирования.
8. Способы создания омических контактов к полупроводникам.
9. Электронно-дырочные переходы. Образование перехода, контактная разность потенциалов.
10. Распределение потенциала для резкого и плавного перехода.
11. Емкость перехода.
12. Влияние центров с глубокими уровнями на емкость.
13. Диодная теория выпрямления. Основные допущения. Вольт-амперная характеристика.
14. Диод с тонкой базой.
15. Вольт-амперная характеристика p-i-n диода.
16. Влияние генерации и рекомбинации носителей на вид вольт-амперной характеристики.
17. Гетеропереходы. Классификация гетеропереходов.
18. Энергетические диаграммы гетеропереходов.
19. Распределение потенциала. Емкость гетеропереходов.
20. Вольт-амперные характеристики гетеропереходов для анизотипных и изотипных случаев.
21. Переходные процессы в полупроводниковых диодах. Определение и классификация переходных процессов.
22. Переходный процесс при переключении диода из нейтрального в пропускное состояние.
23. Переходный процесс при переключении диода из пропускного состояния в запорное.
24. Электронные процессы в структурах металл-диэлектрик-полупроводник.
25. Энергетические диаграммы идеальных МДП-структур.
26. Концентрация носителей заряда в структуре.
27. Вольт-фарадные характеристики МДП-структур для различных частот.
28. Общая классификация приборов на основе контактных явлений.
29. Области применения различных видов контактов.

**1.2 Контрольные задания и иные материалы,  
используемые в процессе текущей аттестации**

## **Темы рефератов**

1. Ширина запирающего слоя. Емкость запирающего слоя Шоттки.
2. Практические рекомендации по созданию омических контактов к полупроводникам.
3. Вольт-амперная характеристика диода с тонкой базой
4. Вольт-амперная характеристика p-i-n диода
5. Причины многообразия энергетических диаграмм гетеропереходов
6. Переходный процесс при переключении диода из нейтрального в пропускное состояние.
7. Переходный процесс при переключении диода из пропускного состояния в запирающее.
8. Вольт-фарадные характеристики МДП-структур для различных частот.

## **Контрольная работа № 1**

Опишите различия в вольт-амперных характеристиках контакта металл-полупроводник и p-n перехода в важных практических случаях

## **Контрольная работа № 2**

Дайте характеристику многообразным вольт-амперным и вольт-емкостным характеристикам гетеропереходов.

## **2.1 Описание процедуры выставления оценки**

По итогам аттестационных мероприятий выставляется зачет/незачет.

Для успешного освоения дисциплины очень важна самостоятельная работа аспирантов над конспектами прослушанных лекций и разделами курса для самостоятельного изучения. Материал, законспектированный на лекциях, необходимо дома еще раз прорабатывать и при необходимости дополнять информацией, полученной на консультациях, из учебной литературы при самостоятельной проработке разделов курса.

Для проверки и контроля усвоения теоретического материала, приобретенных практических навыков работы и проведения расчетов, в течение обучения проводятся мероприятия текущей аттестации в виде рефератов и контрольных работ. Также проводятся консультации (при необходимости) по разбору заданий для самостоятельной работы, которые вызвали затруднения.

Зачет принимается в виде устного опроса с обсуждением 1 вопроса из списка вопросов к зачету, а также углубленное обсуждение 1 из подготовленных рефератов экзаменуемого. На самостоятельную подготовку к зачету выделяется не менее 3 дней, во время подготовки к зачету предусмотрена групповая консультация.