

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**федеральное государственное автономное**  
**образовательное учреждение высшего образования**  
**«Национальный исследовательский**  
**Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»**

УТВЕРЖДЕНО

решением ученого совета ННГУ

протокол от "30"ноября 2022 г. №13

**Рабочая программа дисциплины**  
**«Физика полупроводниковых приборов»**

Уровень высшего образования

**Подготовка научных и научно-педагогических кадров**

Научные специальности

1.1.2. Дифференциальные уравнения и математическая физика, 1.1.4. Теория вероятностей и математическая статистика, 1.1.5. Математическая логика, алгебра, теория чисел и дискретная математика, 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела, 1.2.1. Искусственный интеллект и машинное обучение, 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, 1.3.11. Физика полупроводников, 1.3.19. Лазерная физика, 1.3.4. Радиофизика, 1.3.7. Акустика, 1.3.8. Физика конденсированного состояния, 1.4.1. Неорганическая химия, 1.4.2. Аналитическая химия, 1.4.3. Органическая химия, 1.4.4. Физическая химия, 1.4.7. Высокомолекулярные соединения, 1.4.8. Химия элементоорганических соединений, 1.5.11. Микробиология, 1.5.15. Экология, 1.5.2. Биофизика, 1.5.21. Физиология и биохимия растений, 1.5.5. Физиология человека и животных, 2.2.2. Электронная компонентная база микро и нанoeлектроники, квантовых устройств, 3.2.7. Аллергология и иммунология, 5.1.1. Теоретико-исторические правовые науки, 5.1.2. Публично-правовые (государственно-правовые) науки, 5.1.3. Частно-правовые (цивилистические) науки, 5.1.4. Уголовно-правовые науки, 5.1.5. Международно-правовые науки, 5.12.1. Междисциплинарные исследования когнитивных процессов, 5.2.3. Региональная и отраслевая экономика, 5.2.4. Финансы, 5.2.6. Менеджмент, 5.3.7. Возрастная психология, 5.4.2. Экономическая социология, 5.4.4. Социальная структура, социальные институты и процессы, 5.4.6. Социология культуры, 5.4.7. Социология управления, 5.5.2. Политические институты, процессы, технологии, 5.5.4. Международные отношения, глобальные и региональные исследования, 5.6.1. Отечественная история, 5.6.2. Всеобщая история, 5.6.7. История международных отношений и внешней политики, 5.7.1. Онтология и теория познания, 5.8.2. Теория и методика обучения и воспитания, 5.8.7. Методология и технология профессионального образования, 5.9.2. Литературы народов мира, 5.9.5. Русский язык. Языки народов России, 5.9.6. Языки народов зарубежных стран (с указанием конкретного языка или группы языков), 5.9.9. Медиакоммуникации и журналистика

Нижний Новгород  
2023 год

## **1. Место и цель дисциплины в структуре ПА**

Дисциплина «**Физика полупроводниковых приборов**» относится к числу *факультативных* дисциплин образовательного компонента программы аспирантуры и изучается на 3-ом году обучения в 6 семестре.

**Цель дисциплины** – углубленное ознакомление аспирантов с особенностями физики полупроводниковых приборов, а также методами их описания металлов.

## **2. Планируемые результаты обучения по дисциплине**

Выпускник, освоивший программу, должен

### **Знать:**

- методы критического анализа и оценки современных научных достижений, а также методы генерирования новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях, знать о понятии кристаллическая решетка в физике полупроводниковых структур, о теории р-п перехода, распределении заряда, структуры поля и потенциала в переходе;
- современное состояние науки в области радиофизики, а также принципы работы современных полевых и биполярных транзисторов в схемах (комплиментарные схемы, базовые элементы логики);
- современные подходы к моделированию различных явлений в области радиофизики и оценке полученных результатов и знать о методах моделирования процессов переноса зарядов в полупроводниковых приборах.

### **Уметь:**

- определять наиболее актуальные направления исследований, уметь разбираться в физических процессах в полупроводниковых структурах;
- самостоятельно формулировать новые научные задачи в области радиофизики и предполагаемые методы их решения, исходя из тенденций развития науки в области радиофизики и этапов профессионального роста, уметь измерять вольтамперные и вольтфарадные характеристики, анализировать их и рассчитывать различные параметры;
- использовать оптические методы диагностики полупроводниковых структур, в частности уметь различать виды транзисторов в зависимости от теории их работы, от их параметров и режимов работы;
- представлять научные результаты;
- самостоятельно интерпретировать результаты научного исследования, уметь проводить моделирование полупроводниковых приборов СВЧ диапазона с учетом различных внешних факторов и проводить анализ полученных данных.

### **Владеть:**

- навыками об анализе высокочастотных свойств полупроводниковых приборов: полевой транзистор с р-п переходом и барьером Шоттки, полевой транзистор металл-диэлектрик-полупроводник, полевой транзистор металл-окисел-полупроводник, биполярный транзистор;
- самостоятельной постановки, критического переосмысления и решения новых задач в области радиофизики; навыками использования современных средств вычислительной техники для расчетов, навыками для использования различных методов моделирования для анализа переноса электронов в полупроводниковых структурах;
- навыками моделирования различных явлений в области радиофизики и оценки полученных результатов, владеть навыками проводить моделирование параметров полевых и биполярных транзисторов и диодов с учетом разброса технологических параметров и внешних факторов;

- современными информационными и коммуникационными технологиями сбора теоретических и эмпирических данных, их анализа и представления полученных результатов исследования, владеть навыками проводить статистический анализ характеристик полупроводниковых приборов при различном нагреве, освещении, сравнивать с экспериментальными данными и проводить обобщение полученных результатов;
- методами планирования, подготовки, проведения НИР, анализа полученных данных, формулировки выводов и рекомендаций, владеть методами составления программ - методик технологии создания СВЧ и терагерцовых полупроводниковых приборов.

### 3. Структура и содержание дисциплины

Объем дисциплины (модуля) составляет 2 з.е., всего - 72 часа, из которых 36 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа), 36 часов составляет самостоятельная работа обучающегося.

**Таблица 1**

**Структура дисциплины**

Наименование раздела дисциплины	Всего, часов	В том числе					
		Контактная работа, часов					Самостоятельная работа обучающегося, часов
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Консультации	Всего	
1. Введение. Кристаллическая структура твердого тела	9	4	-	-	-	4	5
2. Теория р-п перехода, устройства на базе диода	9	4	-	-	-	4	5
3. Биполярный транзистор. Работа биполярных транзисторов в схемах	9	5	-	-	-	5	4
4. Явления на резкой границе раздела материалов	9	5	-	-	-	5	4
5. Полевой транзистор с р-п переходом и барьером Шоттки, полевой транзистор металл-диэлектрик-полупроводник, полевой транзистор металл-окисел-полупроводник	9	5	-	-	-	5	4
6. Работа полевых транзисторов в схемах	8	4	-	-	-	4	4
7. Полупроводниковые приборы СВЧ диапазона	9	4	-	-	-	4	5
8. Оптоэлектронные приборы.	10	5				5	5
Аттестация по дисциплине – зачет							
Итого	72	36	-	-	-	36	36

Таблица 2

## Содержание дисциплины

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела	Форма проведения занятия	Форма текущего контроля*
1	Введение. Кристаллическая структура твердого тела	Кристаллическая решетка. Элементарная ячейка. Прямая и обратная решетка. Ячейка Вигнера-Зейтца. Решетка Браве.	Лекции	-
2	Теория р-п перехода, устройства на базе диода	Резкий и диффузный р-п переходы. Распределение заряда, структура поля и потенциала в переходе. Распределение концентрации основных и неосновных носителей. Переход в состояние равновесия. Обедненный слой. Диод под внешним напряжением. Формула Шокли. Вольтамперные характеристики. Барьерная емкость перехода и сопротивление базы. Пробой р-п перехода. Выпрямители. Стабилизаторы. Варисторы. Варакторы. Диоды с накоплением заряда.	Лекции	Выборочная проверка одного из разделов портфолио, предоставленного проверяющему по электронной почте
3	Биполярный транзистор. Работа биполярных транзисторов в схемах	Типы транзисторов. Теория работы транзистора. Токи, созданные основными и неосновными носителями. Вольтамперные характеристики. Модель Эберса-Молла. Параметры для описания транзисторов. Режимы работы биполярного транзистора. Схемы включения транзисторов. Базовые элементы логики. Высокочастотные свойства.	Лекции	Выборочная проверка одного из разделов портфолио, предоставленного проверяющему по электронной почте
4	Явления на резкой границе раздела материалов	Контакт металл-полупроводник. Барьер Шоттки. Омический контакт. Структура металл-диэлектрик-полупроводник. Структура металл-окисел-полупроводник. Плотность поверхностных состояний. Гетеропереход.	Лекции	Выборочная проверка одного из разделов портфолио, предоставленного проверяющему по электронной почте
5	Полевой транзистор с р-п переходом и барьером	Эффект поля. Распределение потенциала и поля в приборе. Расчет статических вольтамперных характеристик. Типы и основные	Лекции	Выборочная проверка одного из разделов

	Шоттки, полевой транзистор металл-диэлектрик-полупроводник, полевой транзистор металл-окисел-полупроводник	параметры транзисторов. Высокочастотные свойства. Принцип работы транзистора. Распределение потенциала и поля в приборе. Расчет статических вольтамперных характеристик. Типы и основные параметры транзисторов. Высокочастотные свойства. Принцип работы транзистора. Распределение потенциала и поля в приборе. Расчет статических вольтамперных характеристик. Типы и основные параметры транзисторов. Высокочастотные свойства.		портфолио, предоставленного проверяющему по электронной почте
6	Работа полевых транзисторов в схемах	Основные способы включения транзисторов. Комплиментарные схемы. Базовые элементы логики.	Лекции	Выборочная проверка одного из разделов портфолио, предоставленного проверяющему по электронной почте
7	Полупроводниковые приборы СВЧ диапазона	Туннельный диод. Лавинно-пролетный диод. Генератор Ганна.	Лекции	Выборочная проверка одного из разделов портфолио, предоставленного проверяющему по электронной почте
8	Оптоэлектронные приборы.	Фотодетекторы. Полупроводниковые лазеры. Солнечные батареи.	Лекции	Выборочная проверка одного из разделов портфолио, предоставленного проверяющему по электронной почте

#### 4. Формы организации и контроля самостоятельной работы обучающихся

Еженедельно **текст** прочитанной лекции и соответствующие вопросы для контроля текущей успеваемости из списка **5.2** рассылаются по электронной почте обучающимся для

стимулирования самостоятельной внеаудиторной работы и создания личного **портфолио** по дисциплине «**Физика полупроводниковых приборов**».

## **5. Фонд оценочных средств для аттестации по дисциплине**

### **5.1. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине**

При выполнении всех работ учитываются следующие **основные критерии**:

- уровень теоретических знаний (подразумевается не только формальное воспроизведение информации, но и понимание предмета, которое подтверждается правильными ответами на дополнительные, уточняющие вопросы);
- умение использовать теоретические знания при анализе конкретных проблем, ситуаций;
- качество изложения материала, то есть обоснованность, четкость, логичность ответа, а также его полнота (то есть содержательность, не исключающая сжатости);
- способность устанавливать внутри- и межпредметные связи,
- оригинальность мышления, знакомство с дополнительной литературой и другие факторы.

#### **Описание шкалы оценивания на промежуточной аттестации в форме зачета**

<b>Оценка</b>	<b>Уровень подготовленности, характеризуемый оценкой</b>
<i>Зачтено</i>	владение программным материалом, понимание сущности рассматриваемых процессов и явлений, умение самостоятельно обозначить проблемные ситуации в организации научных исследований, способность критически анализировать и сравнивать существующие подходы и методы к оценке результативности научной деятельности, свободное владение источниками, умение четко и ясно излагать результаты собственной работы, следовать нормам, принятым в научных дискуссиях.
<i>Не зачтено</i>	непонимание смысла ключевых проблем, недостаточное владение науковедческой терминологией, неумение самостоятельно обозначить проблемные ситуации, неспособность анализировать и сравнивать существующие концепции, подходы и методы, неумение ясно излагать результаты собственной работы, следовать нормам, принятым в научных дискуссиях.

### **5.2. Примеры типовых контрольных заданий или иных материалов, используемых для оценивания результатов обучения по дисциплине**

1. Особенности кристаллической структуры твердых тел и правила построения ячейки Вигнера-Зейтца.
2. Причины возникновения зонной структуры твердых тел. Эффективная масса электронов и дырок
3. Типы твердых тел: металлы, диэлектрики, полупроводники. Уровень Ферми. Собственная и примесная проводимость. Основные и неосновные носители заряда.
4. Акустические и оптические фононы. Продольные и поперечные колебания. Законы дисперсии для трехмерной решетки.
5. Кинетическое уравнение Больцмана и механизмы рассеяния электронов. Подвижность носителей заряда.
6. Разогрев электронного газа в полупроводниках. Время релаксации импульса и энергии
7. Фотоионизация и фотопроводимость. Механизмы рекомбинации носителей.

8. Диффузионный и дрейфовый ток. Соотношения Эйнштейна. Система уравнений для описания потенциалов, полей и токов. Время жизни и диффузионная длина неосновных носителей заряда.

9. p-n переход в состояние равновесия и под внешним напряжением. Вольт-амперные характеристики перехода.

10. Контакт металл-полупроводник. Гетеропереход.

11. Принципы работы биполярного и гетеробиполярного транзисторов.

12. Биполярный и гетеробиполярный транзисторы.

13. Принципы работы полевого транзистора с управляющим переходом, барьером Шоттки, МДП затвором. Гетерополевые транзисторы.

14. Отличие принципов работы туннельного диода, лавинно-пролетного диода и генератора Ганна.

15. Принципы работы фильтров на поверхностных акустических волнах.

## **6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

а) основная литература:

1. Зи С. М. - Физика полупроводниковых приборов: в 2 кн. - М. : Мир , 1984. - 455 с.

2. Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С. Г. - Физика полупроводников: [учеб. пособие для физ. специальностей вузов]. - М.: Наука, 1977. - 672 с.

3. Киттель Ч. - Элементарная физика твердого тела. - М.: Наука, 1965. - 366 с.

б) дополнительная литература:

1. Зеегер К. - Физика полупроводников: пер. с англ. Р. Бразиса [и др.]. - М.: Мир, 1977. - 615 с.

2. Киреев П. С. – «Физика полупроводников» [учеб. пособие для вузов]. - М.: Высшая школа, 1975. - 584 с.

3. Ансельм, А.И. Введение в теорию полупроводников [Электронный ресурс] : учеб. пособие — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2016. — 624 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/71742>. — Загл. с экрана.

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы:

Электронно-библиотечные системы (электронная библиотека):

<http://e.lanbook.com/>;

<http://www.biblioclub.ru>.

## **7. Материально-техническое обеспечение дисциплины**

- помещения для проведения занятий: лекционного типа, семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации, а также помещения для хранения и профилактического обслуживания оборудования и помещения для самостоятельной работы обучающихся, оснащенные компьютерной техникой с возможностью подключения к сети Интернет и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду ННГУ;

- материально-техническое обеспечение, необходимое для реализации дисциплины, включая лабораторное оборудование;

- лицензионное программное обеспечение: *Windows, Microsoft Office*;

- обучающиеся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья обеспечиваются электронными и (или) печатными образовательными ресурсами в формах, адаптированных к ограничениям их здоровья.

Рабочая программа учебной дисциплины составлена в соответствии с учебным планом, Положением о подготовке научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре) (Постановление Правительства РФ от 30.11.2021 № 2122), Федеральными государственными требованиями к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре) (Приказ Минобрнауки РФ от 20.10.2021 № 951).

Авторы:

Авторы \_\_\_\_\_ Д.А. Савинов

Рецензент \_\_\_\_\_ А.В. Кудрин

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ С.А. Бельков

**Программа одобрена** на заседании Методической комиссии радиофизического факультета от «20» января 2022 года, протокол № 01/22.