

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет  
им. Н.И. Лобачевского»**

Радиофизический факультет

---

УТВЕРЖДЕНО

решением президиума Ученого совета ННГУ

протокол № 1 от 16.01.2024 г.

**Рабочая программа дисциплины**

Физика полупроводниковых приборов

---

Уровень высшего образования

Магистратура

---

Направление подготовки / специальность

03.04.03 - Радиофизика

---

Направленность образовательной программы

Физическая электроника

---

Форма обучения

очная

---

г. Нижний Новгород

2024 год начала подготовки

## 1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.В.ДВ.07.01 Физика полупроводниковых приборов относится к части, формируемой участниками образовательных отношений образовательной программы.

## 2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями и индикаторами достижения компетенций)

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства	
	Индикатор достижения компетенции (код, содержание индикатора)	Результаты обучения по дисциплине	Для текущего контроля успеваемости	Для промежуточной аттестации
ПК-1: Способен анализировать и обрабатывать научную информацию и результаты исследований в области радиофизики, микро- и наноэлектроники, мощной электроники при решении задач своей профессиональной деятельности	<p>ПК-1.1: Применяет принципы сбора и анализа информации, рассматривает и оценивает современные научные достижения, а также генерирует новые идеи при решении исследовательских и практических задач</p> <p>ПК-1.2: Работает с большим объемом данных, систематизирует и анализирует информацию, полученную из различных источников, в том числе с использованием современных информационных и коммуникационных технологий</p>	<p>ПК-1.1: Знать принципы работы основных устройств на базе диода, таких как выпрямители, стабилизаторы, варисторы, варакторы, диоды с накоплением заряда; основы теории работы биполярных и полевых транзисторов различных типов, туннельного диода, лавинно-пролетного диода, генератора Ганна, фотодетекторов, полупроводниковых лазеров, солнечных батарей.</p> <p>ПК-1.2: Знать такие понятия как комплементарные схемы, параметры диодов и транзисторов Уметь различать схемы включения транзисторов. Владеть навыком анализа зонных диаграмм, структуры и вольт-амперных характеристик полупроводниковых приборов.</p>	Собеседование	Зачёт: Задания

<p>ПК-2: Способен выполнять теоретические и экспериментальные исследования и разработки по отдельным разделам тем научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области радиофизики, микро- и наноэлектроники, мощной электроники и оформлять их результаты</p>	<p>ПК-2.1: Анализирует современное состояние исследований в области микро- и наноэлектроники, мощной электроники, современные подходы к описанию и моделированию различных физических явлений и оценке полученных результатов  ПК-2.2: Выбирает и применяет аналитические, аналитико-численные, экспериментальные методы исследования в соответствии с типом поставленной задачи  ПК-2.3: Участвует в планировании, подготовке и проведении НИР  ПК-2.4: Анализирует полученные данные, формулирует выводы и рекомендации по отдельным разделам тем в области микро- и наноэлектроники, мощной электроники</p>	<p>ПК-2.1: Знать основные модели и методы, применяемые для расчетов физических характеристик полупроводниковых приборов.  ПК-2.2: Уметь проводить оценочные расчеты характеристик полупроводниковых приборов, определять физические параметры по вольт-амперным и вольт-фарадным характеристикам.  ПК-2.3: Владеть навыком построения зонных диаграмм контактов на основе гомо и гетероструктур.  ПК-2.4: Владеть навыком построения эквивалентных схем полупроводниковых приборов</p>	<p>Собеседование</p>	<p>Зачёт: Задания</p>
<p>ПК-3: Способен разрабатывать и подготавливать составные части документации, проектов планов и программ проведения отдельных этапов научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок</p>	<p>ПК-3.1: Использует знание нормативных документов для составления заявок, грантов, проектов НИР, применяет заданные требования и правила при оформлении рукописей к публикации в рецензируемых научных изданиях  ПК-3.2: Представляет результаты НИР академическому и бизнес-сообществу  ПК-3.3: Участвует в составлении и подаче конкурсных заявок на выполнение научно-исследовательских и</p>	<p>ПК-3.1: Знать основные правила построения графиков зонной диаграммы, вольт-амперной и вольтфарадных характеристик.  ПК-3.2: Уметь сопоставить конструкции различных полупроводниковых приборов  ПК-3.3: Владеть навыками интерпретации экспериментальных данных, с помощью теоретических</p>	<p>Собеседование</p>	<p>Зачёт: Задания</p>

	проектных работ по направленности Радиофизика	подходов, освоенных в курсе		
--	--	-----------------------------	--	--

### 3. Структура и содержание дисциплины

#### 3.1 Трудоемкость дисциплины

	<b>очная</b>
<b>Общая трудоемкость, з.е.</b>	<b>3</b>
<b>Часов по учебному плану</b>	<b>108</b>
в том числе	
<b>аудиторные занятия (контактная работа):</b>	
- занятия лекционного типа	<b>32</b>
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	<b>0</b>
- КСР	<b>1</b>
<b>самостоятельная работа</b>	<b>75</b>
<b>Промежуточная аттестация</b>	<b>0</b> <b>Зачёт</b>

#### 3.2. Содержание дисциплины

(структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий)

Наименование разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	в том числе			
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них			Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа (практические занятия/лабораторные работы), часы	Всего	
0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	
Тема 1. Теория гомо- и гетероструктур переходов	28	8	0	8	20
Тема 2. Устройства на базе диода	23	8	0	8	15
Тема 3. Биполярные и гетеробиполярные транзисторы транзистор в схемах	28	8	0	8	20
Тема 4. Полевые и гетерополевые транзисторы транзистор	28	8	0	8	20
Аттестация	0				
КСР	1			1	
<b>Итого</b>	<b>108</b>	<b>32</b>	<b>0</b>	<b>33</b>	<b>75</b>

#### Содержание разделов и тем дисциплины

работы солнечной батареи

5. Принцип работы стабилитрона

6. Принцип работы варактора
7. Принцип работы диода Ганна
8. Принцип работы лавино-пролетного диода

#### Тема 3. Биполярные транзисторы

1. Конструкция транзистора и его зонная диаграмма в равновесии, прямом и обратном смещении,
2. Распределение зарядов ионов и носителей заряда, электрического поля и потенциала в транзисторе
3. Вольт-амперная и вольт-фарадная характеристики и эквивалентная схема биполярного транзистора
4. Отличия биполярного и гетеробиполярного транзисторов

#### Тема 4. Полевые транзисторы

1. Конструкция транзистора и его зонная диаграмма в равновесии, прямом и обратном смещении
2. Распределение зарядов ионов и носителей заряда, электрического поля и потенциала в транзисторе
3. Вольт-амперная и вольт-фарадная характеристики, эквивалентная схема полевого транзистора
4. Отличия транзисторов Шоттки, НЕМТ и МДП типов.

Практические занятия /лабораторные работы организуются, в том числе, в форме практической подготовки, которая предусматривает участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью.

На проведение практических занятий / лабораторных работ в форме практической подготовки отводится: очная форма обучения - 4 ч.

#### **4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся**

Самостоятельная работа обучающихся включает в себя подготовку к контрольным вопросам и заданиям для текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведенным в п. 5.

С.В. Оболенский, Н.В. Демарина, Е.В. Волкова. Основы физики полупроводников.

Е.В. Волкова, А.С. Пузанов, С.В. Оболенский. Введение в физику полупроводниковых диодов и методы проектирования с использованием высокопроизводительных вычислений.

Е.А. Тарасова, А.С. Пузанов, Е.В. Волкова, С.В. Оболенский, Е.С. Оболенская. Введение в физику транзисторов.

С.В. Оболенский, А.С. Пузанов, Е.А. Тарасова. Основы теории взаимодействия ионизирующего излучения с веществом.

С. Зи. Физика полупроводниковых приборов.

К.И. Шалимова. Физика полупроводников.

К. Зеегер. Физика полупроводников.

Дополнительная литература

Е. Айсберг. Транзистор? Это очень просто!.

А.М. Водозов. Основы электроники.

В.И. Гаман. Физика полупроводниковых приборов.

В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников. Физика полупроводников.

Р. Смит. Полупроводники.

Д.В. Ди Лоренцо, Д.Д. Канделуола. Полевые транзисторы на арсениде галлия.

Ю. Пожела. Физика быстродействующих транзисторов.

Р. Хокни, Дж. Иствуд. Численное моделирование методом частиц.

М. Шур. Современные приборы на основе арсенида галлия.

А.Н. Бубенников. Моделирование интегральных микротехнологий приборов и схем.

В.П. Дьяконов. Сверхскоростная твёрдотельная электроника. Том 1. Приборы общего назначения.

В.П. Дьяконов. Сверхскоростная твёрдотельная электроника. Том 2. Приборы специального назначения.

С. Зи. Технология СБИС, кн. 1.

С. Зи. Технология СБИС, кн. 2.

## **5. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)**

### **5.1 Типовые задания, необходимые для оценки результатов обучения при проведении текущего контроля успеваемости с указанием критериев их оценивания:**

#### **5.1.1 Типовые задания (оценочное средство - Собеседование) для оценки сформированности компетенции ПК-1:**

1. Вывести вольт-амперную и вольт-фарадную характеристики р-п

перехода. Объяснить физическую природу обратного тока диода. С

использованием зонной диаграммы и распределения концентрации

электронов и дырок дать качественную интерпретацию наличию

небольшого наклона на участке насыщения обратной ветви ВАХ для

реальных р-п переходов.

2. Оценить напряжение пробоя в германиевом р<sup>+</sup>-п переходе.

Считать, что напряженность электрического поля, при которой

наступает пробой, составляет  $\sim 200$  кВ/см.  $\epsilon = 16$ .  $N_D = 2 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>

3. Определить максимальную напряженность электрического поля р-п

перехода в кремнии, если концентрация донорной и акцепторной

примесей  $1,0 \cdot 10^{21}$  м<sup>-3</sup>. Ширина р-п перехода 0,3 мкм. Примесь

полностью ионизирована.

#### **5.1.2 Типовые задания (оценочное средство - Собеседование) для оценки сформированности компетенции ПК-2:**

1. Вывести вольт-амперную и вольт-фарадную характеристики диода

Шоттки. Как будет трансформироваться вольт-фарадная

характеристика и напряжение пробоя Au-p--p+ диода Шоттки при уменьшении толщины p-слоя? Где применяются диоды Шоттки?

Особенности применения диодов Шоттки в смесителях.

2.

При изменении прямого смещения на  $\Delta U = 0,1$  В прямой ток германиевого диода изменяется на  $\Delta I_{пр} = 10$  мА, а при изменении обратного напряжения на  $\Delta U_{обр} = 10$  В, обратный ток изменяется на 40 мкА. Определить дифференциальные сопротивления диода при прямом и обратном смещениях.

### **5.1.3 Типовые задания (оценочное средство - Собеседование) для оценки сформированности компетенции ПК-3:**

1. Объяснить преимущества гетеробиполярного транзистора перед биполярным, для чего численно оценить: 1) степень влияния униполярной инжекции на коэффициент переноса носителей через базу; 2) величину встроенного поля в варизонной базе и связанного с ним увеличения скорости носителей заряда.

2. Вывести ВАХ ПТ с управляющим p-n переходом. Качественно, исходя из распределений концентрации носителей заряда и напряженности электрического поля вдоль канала транзистора, объяснить причины возникновения участка насыщения на выходной ВАХ транзистора.

3. Вывести ВАХ биполярного транзистора. Объяснить причины наличия небольшого наклона на выходных ВАХ транзистора (эффект Эрли).

### **Критерии оценивания (оценочное средство - Собеседование)**

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
не зачтено	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно», ни одна из компетенций не сформирована на уровне «плохо»

## 5.2. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине при промежуточной аттестации

### Шкала оценивания сформированности компетенций

Уровень сформированности компетенций (индикатор достижения компетенций)	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	не зачтено			зачтено			
<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Ошибок нет.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.
<u>Умения</u>	Отсутствие минимальных умений. Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки	Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с отдельными несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов
<u>Навыки</u>	Отсутствие базовых навыков. Невозможность оценить наличие	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые	Имеется минимальный набор навыков для	Продемонстрированы базовые навыки при решении	Продемонстрированы базовые навыки при решении	Продемонстрированы навыки при решении	Продемонстрирован творческий подход к решению

	навыков вследствие отказа обучающегося от ответа	навыки. Имели место грубые ошибки	решения стандартных задач с некоторыми недочетами	стандартных задач с некоторыми и недочетами	стандартных задач без ошибок и недочетов	нестандартных задач без ошибок и недочетов	нестандартных задач
--	--	-----------------------------------	---	---	--	--	---------------------

### Шкала оценивания при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
зачтено	превосходно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне выше предусмотренного программой
	отлично	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично».
	очень хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо»
	хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо».
	удовлетворительно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
не зачтено	неудовлетворительно	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно».
	плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

### 5.3 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения на промежуточной аттестации с указанием критериев их оценивания:

#### 5.3.1 Типовые задания (оценочное средство - Задания) для оценки сформированности компетенции ПК-1

1. Найти профиль напряженности электрического поля в базе дрейфового биполярного p-n-p транзистора при экспоненциальном распределении легирующей примеси в базе  $N_d = N_0 \cdot e^{\alpha x}$ , где x-координата вдоль базы (в направлении от эмиттера к коллектору). Определить знак  $\alpha$  для получения положительного эффекта от наличия поля в базе.
2. Определить сдвиг длинноволновой границы рабочего диапазона германиевого фотодиода при его охлаждении от комнатной температуры (300 K) до температуры жидкого азота (78 K). Зависимость ширины запрещенной зоны от температуры для германия  $W_g = 0.742 - 4.8 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 / (T + 235)$  (эВ).
3. Для структуры n-GaAs/Au рассчитать значение максимальной напряженности электрического поля при внешнем напряжении  $V = 0$  В. Концентрация легирующей примеси в полупроводнике  $N_d = 10^{16}$  см<sup>-3</sup>, контактная разность потенциалов  $V_k = 0,48$  В.

#### 5.3.2 Типовые задания (оценочное средство - Задания) для оценки сформированности компетенции ПК-2

1. Получить выражение для дифференциального сопротивления реального p-n перехода (с учетом сопротивления базы) в зависимости от внешнего напряжения.

2. Оценить величину плотности тока тепловой генерации р-п перехода, если концентрации примесей в р и п областях составляют, соответственно,  $N_A=2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_D=2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Подвижности дырок и электронов взять из справочных материалов. Времена жизни носителей заряда  $\tau_p=\tau_n=10^{-8} \text{ с}$ . Концентрация носителей в собственном полупроводнике  $n_i=2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Найти величину тока при внешнем напряжении  $V=-0,5 \text{ В}$ . Площадь перехода составляет  $1 \text{ мм}^2$ .
3. По графикам прямых ВАХ германиевого и кремниевого диодов установите соответствие номера диода и материала, из которого он изготовлен. Качественно пояснить ответ.

### 5.3.3 Типовые задания (оценочное средство - Задания) для оценки сформированности компетенции ПК-3

1. Вычислить собственную концентрацию носителей заряда в германии при  $T=300 \text{ К}$ . Эффективную массу дырок считать равной  $0,36 \cdot m_0$ , а электронов –  $0,55 \cdot m_0$ , где  $m_0$  – масса электрона в вакууме. Ширина запрещенной зоны при комнатной температуре в германии составляет  $0,66 \text{ эВ}$ .
2. По графику зависимости собственной концентрации носителей заряда от температуры широко используемого в микроэлектронике полупроводника оценить его ширину запрещенной зоны. Определить материал полупроводника.

### Критерии оценивания (оценочное средство - Задания)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
не зачтено	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно», ни одна из компетенций не сформирована на уровне «плохо»

## 6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

Основная литература:

- Оболенский Сергей Владимирович. Основы физики полупроводников. Транспорт носителей заряда в электрических полях : учеб. пособие / Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского. - Н. Новгород : Изд-во ННГУ, 2007. - 64 с. - В надзаг.: Приоритетный нац. проект "Образование". Инновац. образоват. программа Нижегород. ун-та: Образоват.-науч. центр "Информационно-телекоммуникационные системы: физические основы и математическое обеспечение". - ISBN 978-5-91326-032-1 : 30.00., 3 экз.
- Волкова Екатерина Валерьевна. Полупроводниковые диоды : учеб. пособие для студентов ННГУ, обучающихся по направлениям подготовки "Радиофизика", "Фундам. информатика и информ. технологии" и специальности "Информ. безопасность телекоммуникац. систем" / Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского. - Н. Новгород : Изд-во ННГУ, 2014. - 108 с. - 123.84., 3 экз.
- Шалимова Клавдия Васильевна. Физика полупроводников : [учеб. для вузов по специальности "Полупроводниковые и микроэлектрон. приборы"]. - 3-е изд., перераб. и доп. - М. : Энергоатомиздат, 1985. - 391 с. : ил. - 1.20., 38 экз.
- Введение в физику транзисторов : учебное пособие / Е. А. Тарасова, А. С. Пузанов, Е. В. Волкова [и др.] ; ННГУ им. Н. И. Лобачевского. - Нижний Новгород : Изд-во ННГУ, 2019. - 88 с. - Текст : электронный., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=795266&idb=0>.

Дополнительная литература:

1. Бонч-Бруевич Виктор Леопольдович. Физика полупроводников : [учеб. пособие для физ. специальностей вузов]. - М. : Наука, 1977. - 672 с. : ил. - 72.00., 67 экз.
2. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов : в 2 кн. [Кн.] 1 / пер. с англ. В. А. Гергеля, В. В. Ракитина ; под ред. Р. А. Сурица. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Мир , 1984. - 455 с. : ил. - 2.20., 16 экз.
3. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов : в 2 кн. [Кн.] 2 / пер. с англ. В. А. Гергеля [и др.] ; под ред. Р. А. Сурица. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Мир , 1984. - 455 с. : ил. - 2.20., 16 экз.

Программное обеспечение и Интернет-ресурсы (в соответствии с содержанием дисциплины):

База данных полупроводниковых материалов и гетеропереходов <http://www.matprop.ru/>

### **7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)**

Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечены доступом в электронную информационно-образовательную среду.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки/специальности 03.04.03 - Радиоп физика.

Автор(ы): Оболенский Сергей Владимирович, доктор технических наук, профессор.

Заведующий кафедрой: Оболенский Сергей Владимирович, доктор технических наук.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 18.12.2023, протокол № 09/23.