

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
(факультет / институт / филиал)

УТВЕРЖДЕНО
решением президиума
ученого совета ННГУ
протокол от
«31» мая 2023 г. № 6

Рабочая программа дисциплины

**Физика полупроводниковых
приборов**

(наименование дисциплины (модуля))

Уровень высшего образования
магистратура

(бакалавриат / магистратура / специалитет)

Направление подготовки / специальность
03.04.03 радиофизика

(указывается код и наименование направления подготовки / специальности)

Направленность образовательной программы
Физическая электроника

(указывается профиль / магистерская программа / специализация)

Форма обучения
очная

(очная / очно-заочная / заочная)

Нижегород

2023 год

1. Место дисциплины в структуре ООП

№ варианта	Место дисциплины в учебном плане образовательной программы	Стандартный текст для автоматического заполнения в конструкторе РПД
1	Блок 1. Дисциплины (модули) Часть, формируемая участниками образовательных отношений	Дисциплина «Физика полупроводниковых приборов» Б1.В.ДВ.07.01 относится к части ООП направления подготовки 03.04.03 «Радиофизика», формируемой участниками образовательных отношений.

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**	
ПК-1 Способен анализировать и обрабатывать научную информацию и результаты исследований в области микро- и, нанoeлектроники, мощной электроники при решении задач своей профессиональной деятельности	<p>ПК-1.1. Знает принципы сбора и анализа информации, методы критического анализа и оценки современных научных достижений, а также методы генерирования новых идей при решении исследовательских и практических задач.</p> <p>ПК-1.2. Умеет работать с большим объемом данных, систематизировать и анализировать информацию, полученную из различных источников.</p> <p>ПК-1.3. Владеет современными информационными и коммуникационными</p>	<p>Знать основные устройства на базе диода, такие как выпрямители, стабилизаторы, варисторы, варакторы, диоды с накоплением заряда.</p> <p>Знать теорию работы и типы биполярных транзисторов</p> <p>Уметь различать схемы включения транзисторов.</p> <p>Владеть навыком анализировать режимы работы биполярного транзистора.</p>	зачет

	технологиями сбора теоретических и эмпирических данных, их анализа и представления полученных результатов исследования.		
<i>ПК-2</i> Способен выполнять теоретические и экспериментальные исследования и разработки по отдельным разделам тем научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области микро- и, нанoeлектроники, мощной электроники и оформлять их результаты	<p>ПК-2.1. Знает современное состояние исследований в области микро- и, нанoeлектроники, мощной электроники, современные подходы к описанию и моделированию различных физических явлений и оценке полученных результатов.</p> <p>ПК-2.2. Умеет выбирать и применять аналитические, аналитико-численные, экспериментальные методы исследования в соответствии с типом поставленной задачи.</p> <p>ПК-2.3. Владеет навыками планирования, подготовки, проведения НИР, анализа полученных данных, формулировки выводов и рекомендаций по отдельным разделам тем в области микро- и, нанoeлектроники, мощной электроники.</p>	<p>Знать такие понятия, как комплементарные схемы, базовые элементы логики, туннельный диод, лавинно-пролетный диод, генератор Ганна, фотодетекторы, полупроводниковые лазеры, солнечные батареи.</p> <p>Уметь различать основные способы включения транзисторов.</p> <p>Владеть навыком анализа полупроводниковых приборов СВЧ диапазона и оптоэлектронных приборов.</p>	<i>зачет</i>
<i>ПК-3</i> Способен разрабатывать и подготавливать составные части документации, проектов планов и программ	ПК-3.1. Знает нормативные документы для составления заявок, грантов, проектов НИР, требования к содержанию и правила оформления	<p>Знать основные методы написания протоколов и отчетов по измерениям</p> <p>Уметь оформлять рукописи, протоколы, отчеты</p> <p>Владеть навыками оформления протоколов и отчетов</p>	<i>зачет</i>

<p>проведения отдельных этапов научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок</p>	<p>рукописей к публикации в рецензируемых научных изданиях.</p> <p>ПК-3.2. Умеет представлять результаты НИР академическому и бизнес-сообществу.</p> <p>ПК-3.3. Владеет навыками составления и подачи конкурсных заявок на выполнение научно-исследовательских и проектных работ по направленности Радиофизика.</p>		
---	---	--	--

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная форма обучения
Общая трудоемкость	3 ЗЕТ
Часов по учебному плану	108
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа): - занятия лекционного типа	33
самостоятельная работа	75
КСР	1
Промежуточная аттестация – экзамен/зачет	Зачет

3.2. Содержание дисциплины

4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

В соответствии с рабочей программой и тематическим планом изучение дисциплины проходит в виде аудиторной и самостоятельной работы студентов. Учебный процесс в аудитории осуществляется в форме лекционных занятий.

Контрольные вопросы и задания для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведены в п. 5.2.

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля), форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	Всего (часы)		В том числе														Самостоятельная работа обучающегося, часы	
			Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы															
			из них															
	Занятия лекционного типа		Занятия семинарского типа		Занятия лабораторного типа		Консультации		Всего									
Очная	Очно-заочная	Очная	Очно-заочная	Очная	Очно-заочная	Очная	Очно-заочная	Очная	Очно-заочная	Очная	Очно-заочная	Очная	Очно-заочная	Очная	Очно-заочная			
1. Теория р-п перехода	8		3										3		5			
2. Устройства на базе диода	10		3										3		7			
3. Биполярный транзистор	10		3										3		7			
4. Работа биполярных транзисторов в схемах	10		3										3		7			
5. Явления на резкой границе раздела материалов	10		3										3		7			
6. Полевой транзистор с р-п преходом и барьером Шоттки	10		3										3		7			
7. Полевой транзистор металл-диэлектрик-полупроводник	10		3										3		7			
8. Полевой транзистор металл-окисел-полупроводник	10		3										3		7			
9. Работа полевых транзисторов в	10		3										3		7			

схемах																			
10.Полупроводниковые приборы СВЧ диапазона	10		3											3			7		
11.Оптоэлектронные приборы	9		2											2			7		
Промежуточная аттестация зачет																			
Итого	108		32											32			75		

5. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине (модулю),

включающий:

5.1. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)	Шкала оценивания сформированности 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, без ошибок.	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.	Продemonстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме.	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Продemonстрированы все основные умения, решены все основные задачи с отдельными несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме.	Продemonстрированы все основные умения,. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов

<u>Навыки</u>	Отсутствие владения материалом. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки.	Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов.	Продемонстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов.	Продемонстрирован творческий подход к решению нестандартных задач
---------------	--	--	---	---	---	---	---

Шкала оценки при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
	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
зачтено	отлично	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «отлично»
	очень хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «очень хорошо»
	хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «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», ни одна из компетенций не сформирована на уровне «плохо»
	плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

5.2. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения.

5.2.1 Контрольные вопросы

вопросы	Код формируемых
---------	-----------------

	<i>компетенции</i>
Распределение заряда, структура поля и потенциала в р-п переходе.	<i>ПК-1, ПК-2, ПК-3</i>
Распределение концентрации основных и неосновных носителей в р-п переходе.	<i>ПК-1, ПК-2, ПК-3</i>
Р-п переход в состояние равновесия. Обедненный слой. Диод под внешним напряжением.	<i>ПК-1, ПК-2, ПК-3</i>
Формула Шокли. Вольт-амперные характеристики.	<i>ПК-1, ПК-2, ПК-3</i>
Барьерная емкость р-п перехода и сопротивление базы.	<i>ПК-1, ПК-2, ПК-3</i>
Теория работы биполярного транзистора. Токи созданные основными и неосновными носителями.	<i>ПК-1, ПК-2, ПК-3</i>
Вольт-амперные характеристики биполярного транзистора. Модель Эберса-Молла.	<i>ПК-1, ПК-2, ПК-3</i>
Контакт металл-полупроводник. Барьер Шоттки. Омический контакт.	<i>ПК-1, ПК-2, ПК-3</i>
Расчет статических вольт-амперных характеристик полевого транзистора. Типы и основные параметры транзисторов.	<i>ПК-1, ПК-2, ПК-3</i>
Основные способы включения транзисторов. Комплементарные схемы. Базовые элементы логики.	<i>ПК-1, ПК-2, ПК-3</i>
Варисторы. Варакторы.	<i>ПК-1, ПК-2, ПК-3</i>
Схемы включения биполярных транзисторов. Базовые элементы логики. Высокочастотные свойства.	<i>ПК-1, ПК-2, ПК-3</i>
Плотность поверхностных состояний. Гетеропереход.	<i>ПК-1, ПК-2, ПК-3</i>
Полевой транзистор металл-окисел-полупроводник. Высокочастотные свойства.	<i>ПК-1, ПК-2, ПК-3</i>
Эффект Холла	<i>ПК-1, ПК-2, ПК-3</i>
Комплементарные схемы.	<i>ПК-1, ПК-2, ПК-3</i>
Лавинно-пролетный диод. Генератор Ганна	<i>ПК-1, ПК-2, ПК-3</i>
Солнечные батареи.	<i>ПК-1, ПК-2, ПК-3</i>

5.2.1 Контрольные задачи

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. Определить максимальную напряженность электрического поля р-п перехода в кремнии, если концентрация донорной и акцепторной примесей $1,0 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$. Ширина р-п перехода 0,3 мкм. Примесь полностью ионизирована.

3. Вывести вольт-амперную характеристику р-п перехода. По аналогии с р-п переходом объяснить процессы протекания тока в гетеропереходе. Объяснить причины возникновения униполярной инжекции в биполярном гетеропереходе. Оценить соотношение электронной и дырочной компоненты токов в биполярном гетеропереходе. В какой конструкции гетероперехода возможна биполярная инжекция?

4. Вывести вольт-амперную и вольт-фарадную характеристику диода Шоттки. Как будет трансформироваться вольт-фарадная характеристика и напряжение пробоя Au-n-n^+ диода Шоттки при уменьшении толщины n-слоя?

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

6. Получив зависимость крутизны ВАХ полевого транзистора с затвором Шоттки и его коэффициента статического усиления от напряжения на затворе и уровня легирования канала, объяснить преимущество канала на основе двумерного электронного газа.

7. Получить зависимость коэффициента усиления полевого транзистора с управляющим р-п переходом от концентрации примеси в канале и напряжения на затворе. Для конкретной выходной ВАХ транзистора построить нагрузочную прямую и графически (качественно) определить динамический диапазон амплитуды входного сигнала (в схеме с общим истоком) для которого реализуется режим линейного усиления.

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

9. Вывести ВАХ ПТ с управляющим р-п переходом. Качественно, исходя из распределений концентрации носителей заряда и напряженности электрического поля вдоль канала транзистора, объяснить причины возникновения участка насыщения на выходной ВАХ транзистора. Объяснить правила выбора сопротивления нагрузки и напряжения питания транзистора для получения максимальной мощности выходного сигнала.

10. Вывести ВАХ биполярного транзистора. Объяснить причины наличия небольшого наклона на выходных ВАХ транзистора (эффект Эрли). Для ответа использовать зонную диаграмму, график распределения концентраций электронов и дырок от продольной координаты в структуре транзистора и эквивалентную схему.

11. Вывести критерий Крэмера для диода Ганна. Оценить, используя критерий, величину критического поля для диода на основе GaAs. Сравните режимы работы диода Ганна.

12. Могут ли одни и те же GaAs и Si p-n переходы (или гетеропереходы) работать в роли как свето- так и фотодиода? Ответ обосновать с помощью зонной диаграммы, законов сохранения энергии и импульса.

13. Нарисуйте энергетические диаграммы p-n-перехода при термодинамическом равновесии и при освещении и укажите направления токов. Выведите выражение для фото-ЭДС в p-n-переходе. Нарисуйте вольт-амперную характеристику.

6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) основная литература:

1. Шалимова, К.В. Физика полупроводников [Электронный ресурс] : учеб. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2010. — 384 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/648>. — Загл. с экрана.
2. Зи С. М. - Физика полупроводниковых приборов: в 2 кн. [Кн.] 1. - М. : Мир , 1984. - 455 с. – 16 экз.
3. Зи С. М. - Физика полупроводниковых приборов: в 2 кн. [Кн.] 2. - М. : Мир , 1984. - 455 с. – 16 экз.
4. Зи С. М. - Физика полупроводниковых приборов: пер. с англ. - М. : Энергия , 1973. - 655 с. – 13 экз.
5. Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С. Г. - Физика полупроводников: [учеб. пособие для физ. специальностей вузов]. - М.: Наука, 1977. - 672 с. – 71 экз.

б) дополнительная литература:

1. Степаненко И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Энергия, 1977. – 672 с. – 10 экз.
2. Пасынков В.В., Чиркин Л.К., Шинков А.П., «Полупроводниковые приборы» Высшая школа, М., 1981. – 8 экз.
3. Ефимов И. Е., Козырь И. Я., Горбунов Ю. И. - Микроэлектроника: Физические и технологические основы, надежность: [учеб. пособие для приборостроит. специальностей вузов]. - М.: Высшая школа, 1986. - 463, [1] с. – 14 экз.
4. Пикус Г.Е. «Основы теории полупроводниковых приборов» Наука, М., 1965 – 32 экз.
5. Киреев П. С. – «Физика полупроводников» [учеб. пособие для вузов]. - М.: Высшая школа, 1975. - 584 с. – 26 экз.
6. Ансельм А. И. – «Введение в теорию полупроводников» [учеб. пособие для физ. специальностей вузов]. - М. : Наука, 1978. - 615 с. – 21 экз.

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Помещения представляют собой учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных программой, оснащенные оборудованием и техническими средствами обучения: компьютеры, проектор, доска.

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 ННГУ по направлению подготовки 03.04.03 «Радиофизика».

Автор Волкова Е.В. _____

и.о. заведующего кафедрой Маругин А.В.

Программа одобрена на заседании методической комиссии радиофизического факультета от «25» мая 2023 года, протокол № 04/23