

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

Методы измерения параметров
полупроводниковых структур
(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 «Методы измерения параметров полупроводниковых структур» Б1.В.ОЗ 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 физики и радиофизики 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><i>Знать</i> основную теорию p-n перехода, биполярного и полевого транзистора.</p> <p><i>Уметь</i> рационально выбирать методы измерения параметров изучаемых транзисторов и диодов.</p> <p><i>Владеть</i> навыком автоматизации измерений параметров изделий микроэлектроники.</p>	экзамен

<p>ПК-2. Способен выполнять теоретические и экспериментальные исследования и разработки по отдельным разделам тем научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области физики и радиофизики и оформлять их результаты</p>	<p>ПК-2.1. Анализирует 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. Выбирает и применяет аналитические, аналитико-численные, экспериментальные методы исследования в соответствии с типом поставленной задачи.</p> <p>ПК-2.3. Участвует в планировании, подготовке и проведении НИР.</p> <p>ПК-2.4. Анализирует полученные данные, формулирует выводы и рекомендации по отдельным разделам тем в области микро- и, нанoeлектроники, мощной электроники.</p>	<p><i>Знать</i> основные численные методы расчета параметров структур и транзисторов.</p> <p><i>Уметь</i> выбирать численные методы расчета параметров структур и транзисторов для конкретной задачи.</p> <p><i>Владеть</i> навыком расчета параметров полупроводниковых структур методом Монте-Карло и в квазигидродинамическом приближении.</p>	<p>экзамен</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.</p> <p>ПК-3.2. Представляет результаты НИР академическому и</p>	<p><i>Знать</i> основные методы написания протоколов и отчетов по измерениям</p> <p><i>Уметь</i> оформлять рукописи, протоколы, отчеты</p> <p><i>Владеть</i> навыками оформления протоколов и отчетов</p>	<p>экзамен</p>

	бизнес-сообществу. ПК-3.3. Участвует в составлении и подаче конкурсных заявок на выполнение научно-исследовательских и проектных работ по направленности Радиофизика.		
--	--	--	--

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	32
самостоятельная работа	29
КСР	2
Промежуточная аттестация – экзамен	45

3.2. Содержание дисциплины

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 Заочная	Очная	Очно-заочная Заочная	Очная	Очно-заочная	Заочная	Очная	Очно-заочная	Заочная	Очная	Очно-заочная	Заочная	Очная	Очно-заочная Заочная
1. Введение. Кристаллическая структура твердого тела, статистика носителей заряда, процессы переноса в неоднородных полупроводниках.	8		4										4		4
2. Теория р-п перехода, устройства на базе диода. Виды полупроводниковых диодов. Измерения вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик полупроводниковых диодов.	8		4										4		4
3. Биполярный транзистор. Работа биполярных транзисторов в схемах. Измерения статических параметров биполярных транзисторов.	8		4										4		4
4. Полевой транзистор с р-п переходом и барьером Шоттки, полевой транзистор металл-диэлектрик-полупроводник, полевой транзистор металл-окисел-полупроводник. Измерения параметров полевых транзисторов с управляющим р-п переходом.	8		4										4		6
5. Основы метрологии. Виды погрешностей. Методы минимизации погрешностей.	8		3										3		6
6. Основы автоматизации	8		3										3		6

измерений. Управляющие программы приборов.																			
7.Методы измерений вольт- фарадных и вольт- амперных характеристик полупроводниковы х структур и приборов.	8			3											3			6	
8.Методы обработки и анализа результатов измерений параметров полупроводниковы х приборов.	8			3											3			4	
9.Численные методы расчета параметров структур и транзисторов.	8			4											4			4	
Промежуточная аттестация - экзамен																			

В рамках лекционных занятий организуются практикумы (семинары), в том числе в форме практической подготовки, которая предусматривает участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью.

Практическая подготовка предусматривает: решение практических заданий и задач, организация семинаров по отдельным разделам дисциплины.

На проведение занятий в форме практической подготовки отводится 4 часа. Практическая подготовка направлена на формирование и развитие:

- практических навыков в соответствии с профилем ОП:

- изучение, анализ научно-технической информации, обобщение отечественного и зарубежного опыта по тематике исследования;
 - аналитическое и численное исследование физических явлений и процессов радиофизическими методами;
 - разработка новых комплексов программ по численному моделированию объектов различной физической природы;
 - планирование и проведение экспериментов с применением современных методов и • формулировка новых задач, возникающих в ходе научных исследований;
 - совершенствование известных и разработка новых методов исследований;
 - анализ получаемых результатов и, при необходимости, корректировка направлений исследований;
 - подготовка и оформление научных статей;
 - составление отчетов и докладов о научно-исследовательской работе;
 - участие в научных конференциях, в том числе международных
 - руководство научной работой обучающихся
- компетенций – ПК-1, ПК-2, ПК-3.

Текущий контроль успеваемости реализуется в рамках занятий лекционного типа, групповых или индивидуальных консультаций.

4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Используются следующие виды самостоятельной работы студента: в читальном зале библиотеки, в учебных кабинетах (лабораториях), компьютерных классах с доступом к ресурсам Интернет и в домашних условиях. Порядок выполнения самостоятельной работы соответствует программе курса и контролируется в ходе проведения лекционных занятий, а также в процессе экзамена по данной дисциплине. Самостоятельная работа подкрепляется учебно-методическим и информационным обеспечением, включающим рекомендованные учебники и учебно-методические пособия, комплекты слайдов, конспекты лекций.

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

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	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые	Продemonstrированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены	Продemonstrированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены	Продemonstrированы все основные умения. Решены все основные задачи . Выполнены все задания, в полном	Продemonstrированы все основные умения, решены все основные задачи с отдельными несущественным	Продemonstrированы все основные умения,. Решены все основные задачи. Выполнены все задания,

	я от ответа	ошибки.	все задания но не в полном объеме.	все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами.	объеме, но некоторые с недочетами.	недочетами, выполнены все задания в полном объеме.	в полном объеме без недочетов
<u>Навыки</u>	Отсутствие владения материалом. Невозможнос ть оценить наличие навыков вследствие отказа обучающего я от ответа	При решении стандартных задач не продемонстр ированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки.	Имеется минимальны й набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами	Продемонстр ированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами	Продемонстри рованы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов.	Продемонстр ированы навыки при решении нестандартн ых задач без ошибок и недочетов.	Продемонстр ирован творческий подход к решению нестандартн ых 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»
	удовлетворител ьно	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	неудовлетворит ельно	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

<i>вопросы</i>	<i>Код формируемой компетенции</i>
1. Виды погрешностей, возникающих при измерении параметров полупроводниковых приборов	ПК-1
2. Методы минимизации погрешностей	ПК-1
3. Нормальные условия для проведения измерений.	ПК-1
4. Методы обработки и анализа результатов измерений	ПК-1
5. Методы измерения подвижности носителей заряда в полупроводниковых приборах	ПК-1
6. Методы измерения профилей распределения электронов в полупроводниковых структурах.	ПК-1
7. Методы анализа дефектов в полупроводниковых структурах.	ПК-2
8. Принцип работы n^+/n^- полупроводникового контакта и диода Шоттки	ПК-2
9. Вольт-фарадный метод.	ПК-2, ПК-3
10. Локально-полевое, диффузионно-дрейфовое приближение	ПК-2, ПК-3
11. Квазигидродинамический метод	ПК-2, ПК-3
12. Метод Монте-Карло	ПК-2, ПК-3

5.2.2. Типовые тестовые задания для оценки сформированности компетенции ПК-1

- Объяснить распределение концентрации электронов, наличие электрического поля и потенциального барьера на границе n^+ - n перехода. Используя условия равновесия в такой системе вывести соотношение Эйнштейна. Объяснить физический смысл теплового потенциала как коэффициента пропорциональности между подвижностью и коэффициентом диффузии.
- При $T=300$ К удельное сопротивление образца собственного кремния составляет $2.3 \cdot 10^5$ Ом·см. Какова концентрация собственных носителей заряда? Если через образец пропустить ток, то какая его часть будет обусловлена электронами? Считать, что $\mu_n=1900$ см²/В·с; $\mu_p=425$ см²/В·с.
- Вывести вольт-амперную и вольт-фарадную характеристику диода Шоттки.
- Найти контактную разность потенциалов в диоде Шоттки n -Ge/Au. Нарисовать зонную диаграмму контакта при термодинамическом равновесии. Удельное сопротивление полупроводника $\rho=1$ Ом·см. Работа выхода электронов из золота 4,7 эВ. Электронное сродство Ge 4 эВ, ширина запрещенной зоны $W_g=0,66$ эВ. Концентрация электронов в собственном германии составляет $n_i=2 \cdot 10^{13}$ см⁻³. Подвижность электронов $\mu_n=3500$ см²/Вс. Определить толщину несмещенного перехода, если диэлектрическая проницаемость составляет $\epsilon=16$.

Типовые тестовые задания для оценки сформированности компетенции ПК-2

- Оценить величину плотности тока тепловой генерации p - n перехода, если концентрации примесей в p и n областях составляют, соответственно, $N_A=2 \cdot 10^{14}$ см⁻³, $N_D=2 \cdot 10^{16}$ см⁻³. Подвижности дырок и электронов $\mu_p=1900$ см²/Вс, $\mu_n=3500$ см²/Вс. Времена жизни носителей заряда $\tau_p=\tau_n=10^{-3}$ с.

Концентрация носителей в собственном полупроводнике $n_i=2\cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Найти величину тока в р-п переходе при внешнем напряжении $V=+0,15 \text{ В}$; $-0,5 \text{ В}$; -2 В . Площадь перехода составляет 1 мм^2 .

2. Рассчитать контактную разность потенциалов в *Ge* р-п переходе. Удельное сопротивление р и n областей $\rho=2 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Как изменится высота энергетического барьера при изменении напряжения с $V=+0,15 \text{ В}$ до $V=-5 \text{ В}$? Нарисовать зонные диаграммы. Концентрация носителей в собственном полупроводнике $n_i=2\cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Изменится ли (и если изменится, то как) контактная разность потенциалов при нагреве полупроводниковой структуры?
3. Рассчитать параметры гетероструктурного полевого транзистора.
4. Рассчитать концентрацию носителей заряда в полупроводниковой структуре с заданными параметрами.

Типовые тестовые задания для оценки сформированности компетенции ПК-3

1. Перечислить требования к проведению эксперимента по определению параметров полупроводниковых структур и приборов на их основе.

6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) основная литература:

1. Ковтонюк Н. Ф., Концевой Ю. А. - Измерения параметров полупроводниковых материалов. - М.: Металлургия, 1970. - 429 с. – 5 экз.
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.

б) дополнительная 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.

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Для обучения дисциплине имеются специальные помещения для проведения занятий лекционного типа, семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации.

Специальные помещения укомплектованы специализированной мебелью, техническими средствами обучения, служащими для представления информации большой аудитории, компьютерным оборудованием. Для проведения занятий лекционного типа предлагаются наборы демонстрационного оборудования и учебно-наглядных пособий, обеспечивающие тематические иллюстрации, соответствующие программе дисциплины.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО ННГУ по направлению подготовки 03.04.03 «Радиофизика».

Автор (ы) Тарасова Е.А.

и.о. заведующего кафедрой Маругин А.В.

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