

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 ученого совета ННГУ

протокол от

«31» мая 2023 г. № 6

Рабочая программа дисциплины (модуля)

Моделирование параметров перспективных  
СВЧ и терагерцовых приборов

(наименование дисциплины (модуля))

Уровень высшего образования

бакалавриат

(бакалавриат / магистратура / специалитет)

Направление подготовки / специальность

03.03.03 Радиофизика

(указывается код и наименование направления подготовки / специальности)

Направленность образовательной программы

Радиофизика и электроника

(указывается профиль / магистерская программа / специализация)

Квалификация (степень)

бакалавр

(бакалавр / магистр / специалист)

Форма обучения

очная

(очная / очно-заочная / заочная)

Нижний Новгород

2023 год

## 1. Место и цели дисциплины (модуля) в структуре ОПОП

Дисциплина «Моделирование параметров перспективных СВЧ и терагерцовых приборов» относится к дисциплинам по выбору вариативной части (блок Б1.В.ДВ2) основной профессиональной образовательной программы (ОПОП) высшего образования по направлению подготовки 03.03.03 «Радиофизика» на радиофизическом факультете ННГУ. Дисциплина преподаётся в 7-м семестре.

### Целями освоения дисциплины являются:

- дать начальные знания об основных методах моделирования параметров перспективных СВЧ и терагерцовых приборов, сформировать представление о методиках применения радиотехнических измерений для определения параметров СВЧ и терагерцовых приборов и свойств материалов, из которых эти приборы изготовлены;
- научить рассматривать процессы, происходящие в вакуумных и полупроводниковых приборах, и осваивать практические навыки измерений и обработки параметров СВЧ и терагерцовых приборов.

## 2. Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников)

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 осваивать принципы работы и методы эксплуатации современной и перспективной радиоэлектронной, оптической и акустической аппаратуры	ПК-1.1. Применяет теоретические основы создания и принципы функционирования радиоэлектронной, оптической и акустической аппаратуры ПК-1.2. Осваивает новые технологии радиоэлектронной, оптической и акустической аппаратуры, используя специальную, научную и учебную литературу	Знать современное состояние электроники в области радиофизики, в частности для СВЧ и терагерцовых приборов. Уметь решать стандартные задачи электроники с применением информационно-коммуникационных технологий. Владеть современными информационными и коммуникационными	Задача, собеседование

		технологиями сбора теоретических и эмпирических данных, их анализа и представления полученных результатов исследования.	
ПК-2. Способен осваивать и применять современные и перспективные методы проведения теоретических и экспериментальных исследований в области радиофизики	ПК-2.1. Анализирует современное состояние исследований в области физики и радиофизики, 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. Анализирует полученные данные, формулирует выводы и рекомендации в ходе планирования, подготовки, проведения НИР в области радиофизики.	Знать методы радиофизических измерений параметров СВЧ и терагерцовых приборов и свойств материалов, из которых эти приборы изготовлены Уметь проводить измерения параметров СВЧ и терагерцовых приборов Владеть навыками самостоятельной постановки радиофизического эксперимента по определению параметров СВЧ и терагерцовых приборов	Задача, собеседование

### 3. Структура и содержание дисциплины (модуля)

Объем дисциплины (модуля) составляет 2 зачетных единицы, всего 72 часа, из которых 33 часа составляет контактная работа обучающегося с преподавателем ( 0 часов занятия лекционного типа, 32 часа занятия семинарского типа (семинары, научно-практические занятия, лабораторные работы и т.п.), 0 часов групповые консультации, 0 часов индивидуальные консультации, 0 часов мероприятия текущего контроля успеваемости, 1 час мероприятия промежуточной аттестации), 39 часов составляет самостоятельная работа обучающегося.

#### Содержание дисциплины (модуля)

Наименование и	Всего	В том числе
----------------	-------	-------------

краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля),  форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	(часы)			Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них												Самостоятельная работа обучающегося, часы		
				Занятия лекционного типа			Занятия семинарского типа			Занятия лабораторного типа			Консультации					
	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. Процессы транспорта электронов в структурах полупроводниковых приборов. Междолинные переходы, эффект всплеска скорости.	13								6						6			7
2. Пролетные эффекты. Основные полупроводниковые СВЧ и терагерцовые приборы. Диоды на основе сверхрешеток.	13								6						6			7
3. Методы моделирования транспорта электронов в терагерцовых приборах. Квазигидродинамическое приближение. Метод Монте-Карло.	13								6						6			7
4. Методы измерений импульсных вольт-амперных характеристик. Влияние нагрева приборов на их работу.	13								6						6			7
5. Вакуумная электроника	19								8						8			11
Промежуточная аттестация: зачет																		

#### 4. Образовательные технологии

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 лабораторных занятий.

Образовательные технологии, способствующие формированию компетенций используемые на занятиях лабораторного типа:

- проблемное изложение учебного материала.
- регламентированная самостоятельная деятельность студентов;
- решение проблемных ситуаций для реализации технологии коллективной мыслительной деятельности.

#### 5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

5.1. Темы занятий, по которым дается домашнее задание

1. Эффект всплеска скорости
2. Всплеск скорости в коротких структурах
3. Отличие принципов работы туннельного диода, лавинно-пролетного диода и генератора Ганна.
4. Диод на основе сверхрешетки.
5. Методы измерений импульсных вольт-амперных характеристик.
6. Принципы работы полевого транзистора с управляющим переходом, барьером Шоттки, МДП затвором. Гетерополевые транзисторы
7. Принцип работы вакуумного диода.
8. Эффект Шоттки
9. Принцип работы вакуумного триода
10. Тлеющий разряд

Выполнение домашних заданий проверяется на занятиях. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы – основная и дополнительная литература.

#### 6. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине (модулю), включающий:

**6.1.** Перечень компетенций выпускников образовательной программы с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений), характеризующих этапы их формирования, описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования.

**ПК-2:**

Индикаторы компетенции	Критерии оценивания (дескрипторы)						
	«плохо»	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«очень хорошо»	«отлично»	«превосходно»
<u>Знания</u> Знать методы радиофизических измерений	Отсутствие знаний материала	Наличие грубых ошибок в основном	Знание основного материала с рядом негрубых ошибок	Знание основного материала с рядом заметных	Знание основного материала с незначительными	Знание основного материала без ошибок и погрешностей	Знание основного и дополнительного материала

й параметр ов СВЧ и терагерцо вых приборов и свойств материал ов, из которых эти приборы изготовле ны		материа ле		погрешно стей	тельным и погрешн остями	й	ла без ошибок и погрешн остей
<u>Умения</u> Уметь проводит ь измерени я параметр ов СВЧ и терагерцо вых приборов	Отсутству ет умения	Наличие грубых ошибок при проведе нии измерен ий парамет ров СВЧ и терагерц овых приборо в	Способно сть проводит ь измерени я параметр ов СВЧ и терагерцо вых приборов с существе нными ошибками	Способно сть проводит ь измерени я параметр ов СВЧ и терагерцо вых приборов с незначите льными погрешно стями	Способн ость проводит ь измерен ия парамет ров СВЧ и терагерц овых приборо в почти без ошибок и погрешн остей	Способность проводить измерения параметров СВЧ и терагерцовы х приборов	Способн ость проводит ь измерен ия парамет ров СВЧ и терагерц овых приборо в и для других широко использу емых приборо в СВЧ электрон ики
<u>Навыки</u> Владеть навыками самостоя тельной постанов ки радиофиз ического эксперим ента по определе нию параметр ов СВЧ и терагерцо вых	Полное отсутстви е навыка	Отсутст вие навыка	Владение навыком в минималь ном объёме	Посредст венное владение навыком	Достато чное владени е навыком	Хорошее владение навыком	Всестор оннее владени е навыком

приборов							
Шкала оценок по проценту правильно выполненных контрольных заданий	0 – 20 %	20 – 50 %	50 – 70 %	70-80 %	80 – 90 %	90 – 99 %	100%

*ПК-1*

Индикаторы компетенции	Критерии оценивания (дескрипторы)						
	«плохо»	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«очень хорошо»	«отлично»	«превосходно»
<u>Знания</u> Знать современное состояние электроники в области радиофизики, в частности для СВЧ и терагерцевых приборов.	Отсутствие знаний материала	Наличие грубых ошибок в основном материале	Знание основного материала с рядом негрубых ошибок	Знание основного материала с рядом заметных погрешностей	Знание основного материала с незначительными и погрешностями	Знание основного материала без ошибок и погрешностей	Знание основного и дополнительного материала без ошибок и погрешностей
<u>Умения</u> Уметь решать стандартные задачи электроники с применением информационно-коммуникационных технологий.	Отсутствует способность решать стандартные задачи электроники с применением информационно-коммуникационных технологий.	Наличие грубых ошибок при решении стандартных задач электроники с применением информационно-коммуникационных технологий.	Способность решать стандартные задачи электроники с применением информационно-коммуникационных технологий с	Способность решать стандартные задачи электроники с применением информационно-коммуникационных технологий с	Способность решать стандартные задачи электроники с применением информационно-коммуникационных технологий с	Способность решать стандартные задачи электроники с применением информационно-коммуникационных технологий.	Способность решать стандартные и усложненные задачи электроники с применением информационно-коммуникационных технологий.

ий.		ых техноло гий.	нными ошибками	льными погрешно стями	гий почти без ошибок и погрешн остей		ых технолог ий
<u>Навыки</u> Владеть современ ными информа ционным и и коммуни кационны ми технолог иями сбора теоретиче ских и эмпириче ских данных, их анализа и представ ления полученн ых результат ов исследов ания.	Полное отсутстви е навыка	Отсутст вие навыка	Владение навыком в минималь ном объёме	Посредст венное владение навыком	Достато чное владени е навыком	Хорошее владение навыком	Всестор оннее владени е навыком
Шкала оценок по проценту правильн о выполнен ных контроль ных заданий	0 – 20 %	20 – 50 %	50 – 70 %	70-80 %	80 – 90 %	90 – 99 %	100%

## 6.2. Описание шкал оценивания.

Итоговый контроль качества усвоения студентами содержания дисциплины проводится в виде **зачета**, на котором определяется:



- уровень усвоения студентами основного учебного материала по дисциплине;
- уровень понимания студентами изученного материала
- способности студентов использовать полученные знания для решения конкретных задач.

Зачет проводится в устной форме и заключается в ответе студентом на теоретические вопросы курса (с предварительной подготовкой) и последующем собеседовании в рамках тематики курса. Собеседование проводится в форме вопросов, на которые студент должен дать краткий ответ. Практическая часть предусматривает выполнение измерений параметров СВЧ и терагерцовых приборов в рамках знаний, умений и навыков, полученных в итоге освоения дисциплины.

Критерии оценок.

Оценка	Уровень подготовки
Зачет	Высокий уровень подготовки, безупречное владение теоретическим материалом, студент демонстрирует творческий подход к решению нестандартных ситуаций. Студент дал полный и развернутый ответ на все теоретические вопросы билета, подтверждая теоретический материал практическими навыками. Студент активно работал на занятиях.  70-100 %-ное выполнение контрольных заданий
Не зачет	Подготовка абсолютно недостаточная. Студент не отвечает на поставленные вопросы. Студент не может подтвердить свои знания практическими навыками.  Выполнение контрольных заданий менее 70 %.

**6.3.** Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю), характеризующих этапы формирования компетенций.

**Для оценивания результатов обучения в виде знаний используются следующие процедуры и технологии:**

- устные ответы на вопросы.

**Для оценивания результатов обучения в виде умений и навыков используются следующие процедуры и технологии:**

- лабораторные работы, включающие одно или несколько заданий

**Для проведения итогового контроля сформированности компетенции используются:** устный опрос, решение практических задач.

**6.4.** Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения, характеризующих этапы формирования компетенций и (или) для итогового контроля сформированности компетенции.

#### **Вопросы для оценки сформированности компетенций ПК-1, ПК-2**

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. Процессы транспорта электронов в полупроводниковых структурах
10. Междолинные переходы.
11. Эффект всплеска скорости
12. p-n переход в состоянии равновесия и под внешним напряжением. Вольт-амперные характеристики перехода.
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. Диод на основе сверхрешетки.
15. Метод Монте-Карло.
16. Квазигидродинамическое приближение.
17. Самостоятельный, несамостоятельный, нормальный и аномальный тлеющий разряд
18. Зависимость потенциала зажигания тлеющего разряда от давления
19. Основные области тлеющего разряда и их значение
20. Вольт-амперная характеристика тлеющего разряда
21. Область катодного падения в тлеющем разряде

#### **Типовые задания для оценивания сформированности умений и навыков по компетенциям ПК-1, ПК-2**

1. Измерить импульсную вольт-амперную характеристику для диода на основе 6-ти периодной GaAs/AlAs сверхрешетки. Провести моделирование и получить расчетную вольт-амперную характеристику исследуемой структуры и сравнить с экспериментом. Сделать выводы.
2. Измерить импульсную вольт-амперную характеристику для планарного диода Ганна. Провести моделирование и получить расчетную вольт-амперную характеристику исследуемой структуры и сравнить с экспериментом. Сделать выводы.
3. Измерить импульсную вольт-амперную характеристику для диода на основе 30-ти периодной и 18-ти периодной GaAs/AlAs сверхрешетки. Сравнить полученные зависимости, учесть погрешность измерений и сделать выводы. При необходимости провести численные оценки.

4. Измерить импульсную вольт-амперную характеристику для диода на основе 18-ти периодной GaAs/AlAs сверхрешетки. Провести моделирование и получить расчетную вольт-амперную характеристику исследуемой структуры и сравнить с экспериментом. Сделать выводы.
5. Измерить и сравнить импульсную и статическую вольт-амперную характеристику для «объемного» диода Ганна. Провести моделирование и получить расчетную вольт-амперную характеристику исследуемой структуры и сравнить с экспериментом. Сделать выводы о преимуществах импульсных измерений вольт-амперных характеристик.
6. Снять зависимость напряжения горения тлеющего разряда от расстояния между катодом и анодом для трёх значений тока разряда: 1 мА, 2 мА и 3 мА. По полученным экспериментальным данным построить кривые распределения потенциала в трубке. Отметить приблизительно границы положительного столба.
7. Дана зависимость напряжения горения тлеющего разряда в трубке. Определить катодное падение потенциала и продольный градиент потенциала в положительном столбе.
8. Измерить вольтамперную характеристику тлеющего разряда.

#### **6.5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания.**

Положение «О проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся в ННГУ», утверждённое приказом ректора ННГУ от 13.02.2014 г. №55-ОД,

Положение о фонде оценочных средств, утвержденное приказом ректора ННГУ от 10.06.2015 №247-ОД.

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

а) основная литература:

1. Вайнштейн Л. А. - Электромагнитные волны. - М.: Радио и связь, 1988. - 440 с.
2. Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С. Г. - Физика полупроводников: [учеб. пособие для физ. специальностей вузов]. - М.: Наука, 1977. - 672 с.-69 экз

б) дополнительная литература:

1. Шалимова К. В. - Физика полупроводников: [учеб. пособие для вузов]. - М.: Энергия, 1971. - 311 с.
2. Зеегер К. - Физика полупроводников: пер. с англ. Р. Бразиса [и др.]. - М.: Мир, 1977. - 615 с.3. Смит Р. "Полупроводники" Мир, М., 1982
3. Власов В. Ф. - Электронные и ионные приборы: [учеб. пособие для радиотехн. вузов и фак.]. - М.: Связьиздат, 1960. - 734 с.

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

Лекционный зал, аудитории для практических занятий в группах.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВПО/ВО с учетом рекомендаций и ОПОП ВПО по направлению (профилю), специальности (специализации) Радиофизика

Авторы Оболенская Е.С.

Лещева К.А.

Рецензент Осипов Г.В.

Заведующий кафедрой Бельков С.А.

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