

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

Моделирование параметров перспективных СВЧ и терагерцовых
приборов

Уровень высшего образования
Бакалавриат

Направление подготовки / специальность
03.03.03 - Радиофизика

Направленность образовательной программы
Радиофизика и электроника

Форма обучения
очная

г. Нижний Новгород

2024 год начала подготовки

1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.В.ДВ.02.03 Моделирование параметров перспективных СВЧ и терагерцовых 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 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	ПК-1.1: Знать современное состояние электроники в области радиофизики, в частности для СВЧ и терагерцовых приборов. ПК-1.2: Уметь решать стандартные задачи электроники с применением информационно-коммуникационных технологий. Владеть современными информационными и коммуникационными технологиями сбора теоретических и эмпирических данных, их анализа и представления полученных результатов исследования.	Собеседование Задачи	Зачёт: Контрольные вопросы Задачи
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,	ПК-2.1: Знать методы радиофизических измерений параметров СВЧ и терагерцовых приборов и свойств материалов, из которых эти приборы изготовлены ПК-2.2: Уметь проводить измерения	Собеседование Задачи	Зачёт: Контрольные вопросы Задачи

	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	параметров СВЧ и терагерцовых приборов ПК-2.3: Владеть навыками самостоятельной постановки радиофизического эксперимента по определению параметров СВЧ и терагерцовых приборов		
--	--	--	--	--

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная
Общая трудоемкость, з.е.	2
Часов по учебному плану	72
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	0
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	32
- КСР	1
самостоятельная работа	39
Промежуточная аттестация	0 Зачёт

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
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. Дiodы на основе сверхрешеток.	13		6	6	7
3. Методы моделирования транспорта электронов в терагерцовых	13		6	6	7

приборах. Квазигидродинамическое приближение. Метод Монте-Карло.					
4. Методы измерений импульсных вольт-амперных характеристик. Влияние нагрева приборов на их работу.	13		6	6	7
5. Вакуумная электроника. Основы теории объемных резонаторов.	19		8	8	11
Аттестация	0				
КСР	1			1	
Итого	72	0	32	33	39

Содержание разделов и тем дисциплины

1. Введение. Процессы транспорта электронов в структурах полупроводниковых приборов. Междолинные переходы, эффект всплеска скорости.
2. Пролетные эффекты. Основные полупроводниковые СВЧ и терагерцовые приборы. Диоды на основе сверхрешеток.
3. Методы моделирования транспорта электронов в терагерцовых приборах. Квазигидродинамическое приближение. Метод Монте-Карло.
4. Методы измерений импульсных вольт-амперных характеристик. Влияние нагрева приборов на их работу.
5. Вакуумная электроника. Основы теории объемных резонаторов.

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.

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. Основы теории объемных резонаторов.

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

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:

Совпадают с вопросами промежуточной аттестации

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

Совпадают с вопросами промежуточной аттестации

Критерии оценивания (оценочное средство - Собеседование)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Минимально допустимый уровень знаний и выше. Допущенные ошибки не являлись грубыми. Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи, возможны негрубые ошибки. Выполнены все задания. Имеется минимальный и выше набор навыков для решения стандартных задач, допускаются некоторые недочеты
не зачтено	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки. При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения и базовые навыки

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

Шкала оценивания сформированности компетенций

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	не зачтено		зачтено				
<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место	Минимально допустимый уровень знаний.	Уровень знаний в объеме, соответствующем	Уровень знаний в объеме, соответствующем	Уровень знаний в объеме, соответствующем	Уровень знаний в объеме, превышающем программу

	оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	грубые ошибки	Допущено много негрубых ошибок	программе подготовки . Допущено несколько негрубых ошибок	программе подготовки . Допущено несколько несущественных ошибок	программе подготовки и. Ошибок нет.	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 и 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 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 некоторым и недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторым и 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 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 - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ПК-1

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. Акустические и оптические фононы. Продольные и поперечные колебания. Законы дисперсии для трехмерной решетки.
4. Фотоионизация и фотопроводимость. Механизмы рекомбинации носителей.
5. Междолинные переходы.
6. p-n переход в состояние равновесия и под внешним напряжением. Вольт-амперные характеристики перехода.
7. Эффект всплеска скорости
8. Принципы работы полевого транзистора с управляющим переходом, барьером Шоттки, МДП затвором. Гетерополевые транзисторы.
9. Принципы формирования вольт-фарадных характеристик полупроводниковых приборов
10. Вольт-амперная характеристика вакуумного диода
11. Вольт-амперная характеристика вакуумного триода
12. Коэффициенты отражения и прохождения электродинамических структур

5.3.2 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ПК-2

1. Типы твердых тел: металлы, диэлектрики, полупроводники. Уровень Ферми. Собственная и примесная проводимость. Основные и неосновные носители заряда.
2. Кинетическое уравнение Больцмана и механизмы рассеяния электронов. Подвижность носителей заряда.
3. Разогрев электронного газа в полупроводниках. Время релаксации импульса и энергии
4. Диффузионный и дрейфовый ток. Соотношения Эйнштейна. Система уравнений для описания потенциалов, полей и токов. Время жизни и диффузионная длина неосновных носителей заряда.

5. Процессы транспорта электронов в полупроводниковых структурах
6. Отличие принципов работы туннельного диода, лавинно-пролетного диода и генератора Ганна. Диод на основе сверхрешетки.
7. Методы анализа параметров полупроводниковых приборов.
8. Метод Монте-Карло.
9. Квазигидродинамическое приближение.
10. Электродинамические характеристики и основные параметры объемных резонаторов;
11. Методики измерения свойств электродинамических систем
12. Методики калибровки при различных схемах измерений

Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольные вопросы)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Минимально допустимый уровень знаний и выше. Допущенные ошибки не являлись грубыми. Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи, возможны негрубые ошибки. Выполнены все задания. Имеется минимальный и выше набор навыков для решения стандартных задач, допускаются некоторые недочеты
не зачтено	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки. При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения и базовые навыки

5.3.3 Типовые задания (оценочное средство - Задачи) для оценки сформированности компетенции ПК-1

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 вольт-амперную характеристику вакуумного диода. Провести моделирование и получить расчетную вольт-амперную характеристику исследуемого прибора и сравнить с экспериментом. Сделать выводы.

5.3.4 Типовые задания (оценочное средство - Задачи) для оценки сформированности компетенции ПК-2

1. 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.

2. Измерить вольтамперную характеристику вакуумного триода. Провести моделирование и получить расчетную вольт-амперную характеристику исследуемого прибора и сравнить с экспериментом. Сделать выводы.
3. Провести измерения коэффициента отражения и коэффициента прохождения объёмного резонатора. Провести расчет и моделирование электродинамических характеристик и основных параметров объёмного резонатора и сравнить с полученными экспериментальными данными.

Критерии оценивания (оценочное средство - Задачи)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Минимально допустимый уровень знаний и выше. Допущенные ошибки не являлись грубыми. Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи, возможны негрубые ошибки. Выполнены все задания. Имеется минимальный и выше набор навыков для решения стандартных задач, допускаются некоторые недочеты
не зачтено	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки. При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения и базовые навыки

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

Основная литература:

1. Вайнштейн Лев Альбертович. Электромагнитные волны. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Радио и связь, 1988. - 440 с. : ил. - ISBN 5-256-00064-0 (в пер.) : 2.90., 225 экз.
2. Бонч-Бруевич Виктор Леопольдович. Физика полупроводников : учеб. пособие для физ. специальностей вузов. - М. : Наука, 1990. - 685 с. : ил. - ISBN 5-02-014032-5 : 2.00., 7 экз.
3. Каценеленбаум Борис Захарович. Теория нерегулярных волноводов с медленно меняющимися параметрами / АН СССР, Ин-т радиотехники и электроники. - М. : Изд-во АН СССР, 1961. - 216 с. : черт. - 0.96., 2 экз.
4. Гапонов Виктор Иванович. Электроника : учеб. пособие для вузов. Ч. 1. Физические основы / [ред. В. Б. Брагинский]. - М. : Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1960. - 516 с. - 1.06., 24 экз.
5. Жеребцов Иван Петрович. Основы электроники. - 5-е изд., перераб. и доп. - Л. : Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1989. - 352 с. : ил. - ISBN 5-283-04448-3 (в пер.) : 3.00., 2 экз.

Дополнительная литература:

1. Шалимова Клавдия Васильевна. Физика полупроводников : учебник. - Изд. 4-е, стер. - СПб. ; М. : Краснодар : Лань, 2010. - 400 с. : ил. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - ISBN 978-5-8114-0922-8 : 703.56., 39 экз.
2. Зеегер К. Физика полупроводников : пер. с англ. Р. Бразиса [и др.] / под ред. Ю. К. Пожелы. - М. : Мир, 1977. - 615 с. : ил. - 2.90., 14 экз.
3. Власов Владимир Федорович. Электронные и ионные приборы : [учеб. пособие для радиотехн. вузов и фак.]. - Изд. 3-е, перераб. и доп. - М. : Связьиздат, 1960. - 734 с. : ил. - 1.70., 2 экз.
4. Шевчик Владимир Николаевич. Аналитические методы расчета в электронике СВЧ. - М. : Советское радио, 1970. - 584 с. : черт. - 2.10., 1 экз.

5. Сушков Александр Данилович. Вакуумная электроника : Физико-технические основы : учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по направлениям подготовки бакалавров, магистров и дипломиров. специалистов "Электроника и микроэлектроника". - СПб. ; М. ; Краснодар : Лань, 2004. - 464 с. : ил. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - ISBN 5-8114-0530-8 : 379.94., 20 экз.

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

-

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения, компьютерами, специализированным оборудованием: Лабораторные установки для измерения параметров приборов.

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 03.03.03 - Радиофизика.

Автор(ы): Лещева Ксения Александровна, кандидат физико-математических наук
Тарасова Елена Александровна, кандидат физико-математических наук.

Рецензент(ы): Осипов Григорий Владимирович, доктор физико-математических наук.

Заведующий кафедрой: Оболенский Сергей Владимирович, доктор технических наук.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 18 декабря 2023 г., протокол № 09/23.