

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ПОВОЛЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



УТВЕРЖДАЮ  
Декан РТФ

УТВЕРЖДАЮ /А.Н. Дедов/  
(Ф.И.О. декана (директора института))

14.02.2024 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)**

Б.1.2.7 Нанoeлектроника

(код и наименование дисциплины по учебному плану)

Направление подготовки  
(специальность)

11.03.04 Электроника и нанoeлектроника

Квалификация выпускника

Бакалавр

(бакалавр/магистр/специалист)

Направленность

Электронные приборы и устройства

Курс 4  
Семестр 7

**Распределение учебного времени**

Трудоемкость по учебному плану	108 / 3	часов/зачетных единиц
Лекции	30	часов
Лабораторные работы	-	часов
Практические занятия	30	часов
Иная контактная работа	-	часов
Всего контактной работы (без учета экз.)	60	часов
Контактная работа по экзамену	-	часов
Курсовой проект (работа)	-	семестр
Самостоятельная работа обучающихся (без учета экз.)	48	часов
Самостоятельная работа по подготовке к экзамену	-	часов
Экзамен	-	семестр
Зачет	7	семестр
БРК, ДЗ	-	семестр

(год)

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО направления подготовки (специальности) 11.03.04 Электроника и нанoeлектроника

Программу составили:

доцент с ученой степенью кандидата наук	КиПР	СОГЛАСОВАНО	А.В. Мороз
(должность)	(кафедра)		(И.О. Фамилия)

РАССМОТРЕНА и ОДОБРЕНА на заседании кафедры, за которой закреплена дисциплина  
Кафедра конструирования и производства радиоаппаратуры

(наименование кафедры)	
15.01.2024	протокол № 12
(дата)	
Заведующий кафедрой	СОГЛАСОВАНО
	Н.И. Сушенцов
	(И.О. Фамилия)

Рабочая программа СОГЛАСОВАНА с факультетом (институтом), выпускающей(ими)  
кафедрой(ами).  
СООТВЕТСТВУЕТ действующей ОП.

Заведующий кафедрой	СОГЛАСОВАНО	Н.И. Сушенцов
		(И.О. Фамилия)

Председатель методической комиссии факультета (института), в который входит  
выпускающая кафедра

СОГЛАСОВАНО	А.Н. Дедов
	(И.О. Фамилия)

Эксперт(ы): Лапин Владимир Авангардович, директор ООО "НПФ Мета-Хром"

Рабочая программа проверена и зарегистрирована в УМЦ 11.03.2024 г.  
Специалист учебно-методического центра СОГЛАСОВАНО /Т.А. Смирнова/

## Раздел 1. ЦЕЛЬ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Целью освоения дисциплины является достижение планируемых результатов обучения, соответствующих установленным в ОПОП индикаторам достижения компетенций:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции	Результаты обучения
1. ПК-1 Способен строить простейшие физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники и наноэлектроник и различного функционального назначения, а также использовать стандартные программные средства их компьютерного моделирования	ПК-1.1. Знает принципы математического моделирования электронных приборов и устройств различного функционального назначения, стандартные методики планирования и проведения экспериментов.	<b>знания:</b> физические принципы работы и технологических процессов изготовления наноэлектронных транзисторов, устройств одноэлектроники, спинтроники, квантовых компьютеров <b>умения:</b> <b>навыки:</b>
	ПК-1.2. Умеет строить физические и математические модели моделей, узлов, блоков.	<b>знания:</b> <b>умения:</b> Умеет строить физические и математические модели наноэлектронных транзисторов, устройств одноэлектроники, спинтроники,, квантовых компьютеров <b>навыки:</b>
	ПК-1.3. Владеет навыками компьютерного моделирования.	<b>знания:</b> <b>умения:</b> <b>навыки:</b> Владеет навыками компьютерного моделирования наноэлектронных транзисторов, устройств одноэлектроники, спинтроники,, квантовых компьютеров

## Раздел 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОПОП

Дисциплина относится к части, формируемой участниками образовательных отношений ОПОП.

Дисциплина является обязательной

Для продолжения формирования заявленных компетенций необходимы знания предшествующих дисциплин: Основы теории планирования эксперимента (ПК-1), Математическое моделирование физических процессов (ПК-1), Фотовольтаика и наноплазмоники (ПК-1); практик: Производственная практика. Технологическая (проектно-технологическая) практика (ПК-1)

Изучаемая дисциплина является основой для продолжения формирования указанных компетенций в следующих практиках: Преддипломная практика (ПК-1); государственной итоговой аттестации в форме: Подготовка к процедуре защиты и защита выпускной квалификационной работы (ПК-1)

## Раздел 3. ОПИСАНИЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Для формирования заявленных компетенций используются методологические технологии, реализующие деятельностный, личностно-ориентированный, практико-ориентированный

подходы.

Основными стратегическими технологиями являются: дискуссионные, исследовательские, лекционные занятия, практические занятия

На достижение конкретных целей обучения направлены применяемые тактические технологии: задания, классическая лекция, лекция-провокация, проблемная лекция

#### Раздел 4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

##### 7 семестр

Виды и темы занятий	Количество часов	Формируемые компетенции
<b>Теоретические основы наноэлектроники</b>	<b>18</b>	ПК-1
Лекция. Основные положения квантовой механики, используемые в наноэлектронике	2	
Лекция. Физические свойства наноструктур и наноструктурированных материалов	2	
Практическое занятие. Практическая работа 1 Низкоразмерные структуры	2	
Практическое занятие. Практическая работа 2 Проводимость низкоразмерных структур	2	
Практическое занятие. Практическая работа 3 Квантовые колодцы	2	
Задания для самостоятельной работы, в том числе выполнение Изучение лекционного материала и решение практических заданий	8	
<b>Нанотранзисторы</b>	<b>26</b>	ПК-1
Лекция. Кремниевые нанотранзисторы	2	
Лекция. Гетеротранзисторы	2	
Лекция. Полевые нанотранзисторы	2	
Лекция. Транзисторы на основе нанотрубок	2	
Практическое занятие. Практическая работа 4 Расчет распределения электронной плотности в канале нанотранзистора	4	
Практическое занятие. Практическая работа 5 Расчет выходной электрической характеристики нанотранзистора	4	
Задания для самостоятельной работы, в том числе выполнение Изучение лекционного материала и решение практических заданий	10	
<b>Одноэлектроника</b>	<b>18</b>	ПК-1
Лекция. Физические основы одноэлектроники	2	
Лекция. Конструкции одноэлектронных транзисторов	2	
Практическое занятие. Практическая работа 6 Резонансное туннелирование	2	
Практическое занятие. Практическая работа 7 Одноэлектронное туннелирование	2	
Задания для самостоятельной работы, в том числе выполнение Изучение лекционного материала и решение практических заданий	10	
<b>Спинтроника</b>	<b>18</b>	ПК-1
Лекция. Физические основы спинтроники, материалы	2	

спинтроники		
Лекция. Конструкции спинтронных приборов	2	
Практическое занятие. Практическая работа 8 Спин-контролируемое туннелирование	4	
Задания для самостоятельной работы, в том числе выполнение Изучение лекционного материала и решение практических заданий	10	
<b>Квантовый компьютер</b>	<b>28</b>	ПК-1
Лекция. Принципы квантовых вычислений	4	
Лекция. Элементная база квантовых компьютеров	2	
Лекция. Требования к квантовым компьютерам	2	
Лекция. Конструкции квантовых компьютеров	2	
Практическое занятие. Практическая работа 9 Расчет волновых функций электронов в квантовых точках различной формы	4	
Практическое занятие. Практическая работа 10 Расчет энергетического спектра водородоподобной примеси	4	
Задания для самостоятельной работы, в том числе выполнение Изучение лекционного материала и решение практических заданий	10	
Иная контактная работа:	0	

## Раздел 5. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

Изучение дисциплины Нанoeлектроника рекомендуется начать с ознакомления с рабочей программой, ее структурой и содержанием разделов. Учебный материал структурирован, изучение дисциплины осуществляется в тематической последовательности. **Занятия лекционного типа** дают систематизированные знания по дисциплине Нанoeлектроника, концентрируют внимание на наиболее сложных и важных вопросах. Во время лекционных занятий рекомендуется вести конспектирование учебного материала; обращать внимание на формулировки и категории, раскрывающие суть проблемы, явления или процесса; зафиксировать выводы и практические рекомендации. Подготовка к **занятиям семинарского типа** включает ознакомление с планом практического занятия; работу с конспектом лекций, выполнение домашнего задания, работу с учебной и учебно-методической литературой, научными изданиями и электронными образовательными ресурсами, рекомендованными рабочей программой дисциплины Нанoeлектроника.

Содержание **самостоятельной работы** определяется рабочей программой дисциплины Нанoeлектроника, оценочными и методическими материалами, заданиями и указаниями преподавателя. Самостоятельная работа может осуществляться в аудиторной и внеаудиторной формах. Эффективным средством осуществления самостоятельной работы является электронная информационно-образовательная среда университета, которая обеспечивает доступ к образовательной программе, рабочей программе дисциплины Нанoeлектроника, к электронным библиотечным системам, профессиональным базам данных и информационным справочным системам. Периодичность проведения, формы текущего контроля успеваемости, система оценивания хода освоения дисциплин представлены в рабочей программе. Условия аттестации приведены в технологической карте, входящей в состав рабочей программы дисциплины Нанoeлектроника.

Формой промежуточной аттестации по дисциплине Нанoeлектроника является зачёт.

Раздел 6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ И УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

6.1. Учебно-методическое обеспечение

№№ п/п	Список используемой литературы	Количество экземпляров печатных изданий, имеющихся в библиотеке, или электронный адрес издания (ресурса) в сети Интернет
<b>УЧЕБНЫЕ, УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ И НАУЧНЫЕ ИЗДАНИЯ</b>		
1.	Драгунов, Валерий Павлович. Основы нанoeлектроники [Текст] : [учеб. пособие для студентов вузов по направлению "Электроника и микроэлектроника", специальностям "Микроэлектроника и твердотельная электроника", "Микросистем. техника"] / В. П. Драгунов, И. Г. Неизвестный, В. А. Гридчин. М.: Физматкнига Логос, 2006. - 494 с. ISBN 5-98704-054-X5-89155-149-7. Экземпляры: всего 10.	10
2.	Наноматериалы. Нанотехнологии. Наносистемная техника [Текст] : мировые достижения за 2005 год : сборник / [ред. П. П. Мальцев]. М.: Техносфера, 2006. - 149 с. ISBN 5-94836-085-7. Экземпляры: всего 7.	7
3.	Введение в процессы интегральных микро- и нанотехнологий [Текст] : в 2 т. : [учеб. пособие] / под общ. ред. Ю. Н. Коркишко. - (Нанотехнологии). Т. 1 : Физико-химические основы технологии микроэлектроники / Ю. Д. Чистяков, Ю. П. Райнова, 2010. - 392 с. ISBN 978-5-9963-0335-9. Экземпляры: всего 49.	49
4.	Щука, Александр Александрович. Нанoeлектроника [Текст] : учебное пособие : по направлению подготовки "Прикладные математика и физика" / А. А. Щука; под редакцией А. С. Сигова. 4-е изд. Москва: Лаборатория знаний, 2019. - 342 с. ISBN 978-5-00101-156-9. Экземпляры: всего 15.	15
5.	Игнатов, А. Н. Классическая электроника и нанoeлектроника [Электронный ресурс] : учебное пособие / А. Н. Игнатов, Н. Е. Фадеева, В. Л. Савиных, В. Я. Вайспайр, С. В. Воробьева. 3-е изд. Москва: ФЛИНТА, 2017. - 728 с. ISBN 978-5-9765-0263-5.	<a href="https://e.lanbook.com/book/106860">https://e.lanbook.com/book/106860</a>
<b>ЭЛЕКТРОННЫЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ</b>		
1.	Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU	<a href="http://elibrary.ru">http://elibrary.ru</a>
2.	Научная электронная библиотека «Киберленинка»	<a href="http://cyberleninka.ru">http://cyberleninka.ru</a>

6.2. Материально-техническая база и программное обеспечение

№№ п/п	Аудитории для проведения учебных занятий, самостоятельной работы и проведения государственной итоговой аттестации	Перечень основного оборудования	Программное обеспечение
1.	420а (III)	Комплект учебной мебели (1)	Microsoft Windows

		Enterprise, Справочная правовая система "Консультант Плюс", Microsoft Office Standard, Агент Dr.Web, Комплект ГАРАНТ-Мастер, Microsoft Access, Microsoft Visio Professional, Microsoft Project Professional, Microsoft Visual Studio Enterprise, Комплект ПО для решения основных пользовательских задач, MATLAB Suite Classroom, Mathcad University Classroom Perpetual - 40, Altium Designer Perpetual EDU v15
--	--	--

## Раздел 7. ФОРМЫ КОНТРОЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ/ ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

Критерии оценивания индикаторов достижения компетенций направлены на:

- усвоение теоретического материала (объем знаний, глубина усвоения), предусмотренного рабочей программой;
- умение излагать материал (четкость, грамотность изложения материала, точность и полнота воспроизведения учебного материала);
- умение применять теоретические знания при решении практических заданий.

Шкала оценивания представлена ниже.

Уровень сформированности элементов компетенции	Критерии оценивания	Шкала оценивания
Пороговый уровень	Обучающийся имеет знания основного материала, проявляет умение логично его излагать, но может допускать неточности в изложении материала, недостаточно правильные формулировки, испытывает затруднения в выполнении практических заданий	Зачтено

### 7.1. Текущий контроль успеваемости

Текущий контроль успеваемости обеспечивает оценивание хода освоения дисциплины (модуля) и производится с применением технологии рейтингового контроля в соответствии с технологической картой дисциплины. Порядок составления технологической карты и алгоритм проведения процедуры оценивания видов деятельности обучающихся, направленных на освоение знаний, умений, навыков и/ или опыта деятельности, по накопительной системе в баллах устанавливается положением о системе РИТМ в ФГБОУ ВО «ПГТУ»

## 7.2. Промежуточная аттестация обучающихся

Промежуточная аттестация обучающихся направлена на оценивание результатов обучения по дисциплине (модулю) и проводится с использованием фондов оценочных средств.

Примеры типовых контрольных заданий из базы фонда оценочных средств по образовательной программе.

1. Современные направления развития электроники (традиционная, кремниевая, электроника, одноэлектроника, спинтроника и др.).
2. Особенности структуры современного кремниевого нанотранзистора
3. Квантовое ограничение за счет внутреннего электрического поля (квантовые ямы, модуляционно - и дельта - легированные структуры).
4. Квантовое ограничение за счет внешнего электрического поля (МДП - структуры и структуры с расщепленным затвором).
5. Баллистический транспорт носителей заряда в наноструктурах. Упругое и неупругое рассеяние, универсальная баллистическая проводимость.
6. Стационарная дрейфовая скорость носителей заряда в полупроводниках. Всплеск дрейфовой скорости при воздействии электрического поля и всплеск дрейфовой скорости в коротких структурах.
7. Баллистический транспорт носителей заряда в полупроводниках и субмикронных приборах.
8. Фазовая интерференция электронных волн, экспериментальное наблюдение этого явления.
9. Вольт-амперные характеристики низкоразмерных структур при движении носителей заряда вдоль потенциальных барьеров, отрицательное сопротивление изгиба.
10. Приборы на интерференционных эффектах (квантовый интерференционный транзистор, кольцевой интерференционный транзистор).
11. Приборы на интерференционных эффектах (полевые транзисторы на отраженных электронах, структура преломляющего переключателя для баллистических электронов).
12. Туннелирование через двухбарьерную структуру с квантовой ямой и сверхрешётку.
13. Оптимизация двухбарьерной туннельной структуры и диапазон её частот.
14. Блоховские осцилляции в объёмных полупроводниках и в сверхрешётках.
15. Приборы на резонансном туннелировании (диоды и транзисторы).
16. Приборы на резонансном туннелировании (транзистор на горячих электронах, логические элементы).
17. Кулоновская блокада (условия наблюдения и основные характеристики).
18. Одно- и двух барьерные структуры в одноэлектронике, их вольт-амперные характеристики.
19. Макроскопическое квантовое туннелирование (сотуннелирование). Проблемы и ограничения одноэлектроники.
20. Приборы на одноэлектронном туннелировании (приборы на основе СТМ, одноэлектронный транзистор к его характеристики).
21. Приборы на одноэлектронном туннелировании (одноэлектронные ловушка и генераторы на одноэлектронных транзисторах, стандарты постоянного тока).
22. Приборы на одноэлектронном туннелировании (логические элементы, тронный параметрон,



квантово-точечный клеточный автомат).

23. Спинтроника, явление гигантского магнетосопротивления при различной геометрии протекания тока.

24. Спин - зависимое туннелирование, температурная зависимость туннельного сопротивления.

25. Управление спинами носителей заряда в полупроводниках (инжекция, перенос и детектирование спин-поляризованных носителей заряда).

26. Эффект Кондо в металлах с магнитными примесями и в квантовых точках.

27. Спинтронные приборы (магнитная головка воспроизведения, запоминающие устройства на эффекте гигантского магнетосопротивления).

### Перечень вопросов для проведения промежуточной аттестации

1. Современные направления развития электроники (традиционная, кремниевая, электроника, одноэлектроника, спинтроника и др.).

2. Особенности структуры современного кремниевого нанотранзистора

3. Квантовое ограничение за счет внутреннего электрического поля (квантовые ямы, модуляционно - и дельта - легированные структуры).

4. Квантовое ограничение за счет внешнего электрического поля (МДП - структуры и структуры с расщепленным затвором).

5. Баллистический транспорт носителей заряда в наноструктурах. Упругое и неупругое рассеяние, универсальная баллистическая проводимость.

6. Стационарная дрейфовая скорость носителей заряда в полупроводниках. Всплеск дрейфовой скорости при воздействии электрического поля и всплеск дрейфовой скорости в коротких структурах.

7. Баллистический транспорт носителей заряда в полупроводниках и субмикронных приборах.

8. Фазовая интерференция электронных волн, экспериментальное наблюдение этого явления.

9. Вольт-амперные характеристики низкоразмерных структур при движении носителей заряда вдоль потенциальных барьеров, отрицательное сопротивление изгиба.

10. Приборы на интерференционных эффектах (квантовый интерференционный транзистор, кольцевой интерференционный транзистор).

11. Приборы на интерференционных эффектах (полевые транзисторы на отраженных электронах, структура преломляющего переключателя для баллистических электронов). 12. Туннелирование через двухбарьерную структуру с квантовой ямой и сверхрешётку.

13. Оптимизация двухбарьерной туннельной структуры и диапазон её частот.

14. Блоховские осцилляции в объёмных полупроводниках и в сверхрешётках. 15. Приборы на резонансном туннелировании (диоды и транзисторы).

16. Приборы на резонансном туннелировании (транзистор на горячих электронах, логические элементы).

17. Кулоновская блокада (условия наблюдения и основные характеристики).

18. Одно- и двух барьерные структуры в одноэлектронике, их вольт-амперные характеристики.

19. Макроскопическое квантовое туннелирование (сотуннелирование). Проблемы и ограничения одноэлектроники.
20. Приборы на одноэлектронном туннелировании (приборы на основе СТМ, одно-электронный транзистор и его характеристики).
21. Приборы на одноэлектронном туннелировании (одноэлектронные ловушки и генераторы на одноэлектронных транзисторах, стандарты постоянного тока).
22. Приборы на одноэлектронном туннелировании (логические элементы, туннельный параметрон, квантово-точечный клеточный автомат).
23. Спинтроника, явление гигантского магнетосопротивления при различной геометрии протекания тока.
24. Спин - зависимое туннелирование, температурная зависимость туннельного сопротивления.
25. Управление спинами носителей заряда в полупроводниках (инжекция, перенос и детектирование спин-поляризованных носителей заряда).
26. Эффект Кондо в металлах с магнитными примесями и в квантовых точках.
27. Спинтронные приборы (магнитная головка воспроизведения, запоминающие устройства на эффекте гигантского магнетосопротивления).