

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(ФГБОУ ВО «ВГТУ», ВГТУ)

«УТВЕРЖДАЮ»

Председатель ученого совета ФРТЭ

\_\_\_\_\_ В.А. Небольсин

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС  
ДИСЦИПЛИНЫ**

**Б1.В.ОД.9 «ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАНОИНЖЕНЕРИИ»**

для направления подготовки (специальности)

**28.03.02 «Наноинженерия»**

(код, наименование)

Профиль подготовки (специализация)

**«Инженерные нанотехнологии в приборостроении»**

(название профиля, магистерской программы, специализации по УП)

Форма обучения: очная

Срок обучения: нормативный

**Кафедра полупроводниковой электроники и наноэлектроники**

(наименование кафедры-разработчика УМКД)

**УМКД разработал:** Липатов Г.И., кандидат технических наук

(Ф.И.О., ученая степень авторов разработки)

Рассмотрено и одобрено на заседании методической комиссии ФРТЭ

(наименование факультета)

Протокол № \_\_\_\_ от « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Председатель методической комиссии \_\_\_\_\_ Е.Н. Коровин

Воронеж 2017 г.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(ФГБОУ ВПО «ВГТУ», ВГТУ)

«УТВЕРЖДАЮ»

Председатель ученого совета ФРТЭ

\_\_\_\_\_ В.А. Небольсин

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**  
**«ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАНОИНЖЕНЕРИИ»**

**Закреплена за кафедрой:** полупроводниковой электроники и наноэлектроники (ППЭНЭ)

**Направление подготовки (специальности):** 28.03.02 «Наноинженерия»

**Профиль:** «Инженерные нанотехнологии в приборостроении»

**Часов по УП:** 180 / **Часов по РПД:** 180

**Часов по УП (без учета на экзамены):** 144/ **Часов по РПД:** 144

**Часов на самостоятельную работу по УП:** 90 (62,5 %)

**Часов на самостоятельную работу по РПД:** 90 (62,5 %)

**Общая трудоемкость в ЗЕТ:** 5

**Виды контроля в семестрах (на курсах):** Экзамены 5; Зачеты —; Курсовые проекты —;

Курсовые работы 5.

**Форма обучения:** очная. **Срок обучения:** нормативный

**Распределение часов дисциплины по семестрам**

Вид занятий	№ семестров, число учебных недель в семестрах																	
	1/18		2/18		3/18		4/18		5/18		6/18		7/18		8/12		Итого	
	УП	РПД	УП	РПД	УП	РПД	УП	РПД	УП	РПД	УП	РПД	УП	РПД	УП	РПД	УП	РПД
Лекции									36	36							36	36
Лабораторные									18	18							18	18
Практические																		
<b>Ауд. занятия</b>									<b>54</b>	<b>54</b>							<b>54</b>	<b>54</b>
<b>Сам. работа</b>									<b>90</b>	<b>90</b>							<b>90</b>	<b>90</b>
Экзамен									<b>36</b>	<b>36</b>							<b>36</b>	<b>36</b>
<b>Итого</b>									<b>144</b>	<b>144</b>							<b>180</b>	<b>180</b>

Программа составлена на основании Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования (ФГОС ВО) — государственные требования к минимуму содержания и уровня подготовки бакалавра по направлению подготовки 28.03.02 «Наноинженерия». Утвержден приказом Министерства образования Российской Федерации от 3 декабря 2015 г. № 1414.

Программу составил канд. техн. наук, доцент

Г.И. Липатов

Рецензент: д-р техн. наук, профессор

С.А. Акулинин

Рабочая программа дисциплины составлена на основании учебного плана подготовки бакалавров по направлению 28.03.02 «Наноинженерия», профиль «Инженерные нанотехнологии в приборостроении».

Рабочая программа дисциплины рассмотрена и одобрена на заседании кафедры ППЭНЭ.

Протокол № \_\_\_\_ от « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Заведующий кафедрой ППЭНЭ

С.И. Рембеза

Рассмотрено и одобрено на заседании методической комиссии ФРТЭ.

Протокол № \_\_\_\_ от « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Председатель методической комиссии ФРТЭ

Е.Н. Коровин

## 1. ЦЕЛИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

1.1	Целью изучения дисциплины «Физические основы наноинженерии» является формирование у обучающихся знаний в области физики микроэлектромеханических систем, позволяющих понимать принципы работы как отдельных элементов, так и их работу в составе функциональных устройств и интегральных схем.
1.2	Для достижения цели ставятся задачи приобретения обучающимися знаний о:
1.2.1	методах описания и моделирования компонентов микроэлектромеханических систем;
1.2.2	областях использования изделий микро- и наносистемной техники.

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОПОП ВО

Цикл (раздел) ОПОП: вариативная часть		Код дисциплины в УП: Б1.В.ОД.9
2.1	<b>Требования к предварительной подготовке обучающегося:</b> Б1.Б.10 «Физика» Б1.Б.11 «Введение в наноинженерию» Б1.Б.14 «Электротехника» Б1.Б.15 «Техническая механика микросистем»	
2.2	<b>Дисциплины и практики, для которых освоение данной дисциплины необходимо как предшествующее:</b> Б.1.В.ОД.13 «Микроэлектромеханические системы» Б.1.В.ДВ.7.1 «Компьютерное моделирование, расчет и проектирование микросистем» Б.1.В.ДВ.9.1 «Современные технологии проектирования элементов и устройств наноинженерии»	

## 3. КОМПЕТЕНЦИИ ОБУЧАЮЩЕГОСЯ, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Код и наименование компетенции	
ОПК-1	способность использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и экспериментального исследования;
ПК-3	способность проводить информационный поиск по отдельным объектам исследований;
ПК-4	способность осуществлять подготовку данных для составления обзоров и отчетов
ПКВ-1	способность владеть современными методами расчета и проектирования приборов и устройств микро- и нанoeлектроники, способностью к восприятию, разработке и критической оценке новых способов их проектирования;
ПКВ-3	готовность в составе коллектива исполнителей участвовать в исследовании физических принципов работы компонентов микро- и наносистемной техники, возможностей и характеристик используемых материалов.

## В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ ОБУЧАЮЩИЙСЯ ДОЛЖЕН

3.1	<b>Знать:</b> модели компонентов микро- и наносистем, адекватные протекающим в них физическим процессам; формальные процедуры решения задач моделирования компонентов микро- и наносистем (ОПК-1)
3.2	<b>Уметь:</b> использовать методы и средства моделирования компонентов наносистем; разрабатывать математические модели компонентов микро- и наносистем; применять программы моделирования компонентов микро- и наносистем (ОПК-1, ПК-3, ПК-4, ПКВ-3)
3.3	<b>Владеть:</b> навыками моделирования компонентов микро- и наносистем, в том числе с использо-

	ванием программной системы конечно-элементного анализа ANSYS/Multiphysics (ПКВ-1)
--	---

#### 4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Неделя семестра	Виды учебной нагрузки и их трудоемкость в часах					Всего часов
			Лекции	Практ. занятия	Лаб. работы	СРС	Экз.	
1	Микросистемные датчики физических величин	1—5	10		4	22		36
2	Пьезоэффект и использование его в микросистемной технике	6—8	6		4	16		26
3	Электростатический эффект и использование его в микросистемной технике	9—13	10		10	30		50
4	Поверхностные акустические волны и использование их в микросистемной технике	14, 15	4			10		14
5	Аналитические микросистемы	16	2			6		8
6	Оптимизация характеристик интегральных датчиков	17, 18	4			6		10
7	Подготовка к экзамену						36	36
<b>Итого часов</b>			<b>36</b>		<b>18</b>	<b>90</b>	<b>36</b>	<b>180</b>

##### 4.1 Лекции

Неделя семестра	Тема и содержание лекции	Объем часов
<b>1 Микросистемные датчики физических величин</b>		<b>10</b>
2	Основные характеристики преобразователей физических величин: диапазон измерения, чувствительность, точность, линейность, селективность	2
2	Передаточная функция преобразователя и способы описания реакций на внешние воздействия	2
3, 4	Элементы и узлы микросистемных датчиков	4
5	Погрешности измерений, дрейф параметров, шумы	2
<b>2 Пьезоэффект и использование его в микросистемной технике</b>		<b>6</b>
6	Напряжения растяжения и сжатия в твердом теле	2
7	Принципы измерения деформаций. Пьезоэлектрические и тензорезистивные преобразователи	2
8	Датчики давления: области применения; конструктивная реализация; подходы к проектированию и изготовлению	2
<b>3 Электростатический эффект и использование его в микросистемной технике</b>		<b>10</b>
9	Емкостные сенсоры	2
10, 11	Электростатические приводы движения (актюаторы)	4
12	Электростатические коммутаторы	2
13	Микроэлектростатические инжекторы	2
<b>4 Поверхностные акустические волны и использование их в микросистемной технике</b>		<b>4</b>
14	Поверхностные акустические волны (ПАВ) в твердых телах	2
15	Сенсоры на ПАВ: принцип работы, конструктивная реализация и особенности	2
<b>5 Аналитические микросистемы</b>		<b>2</b>
16	Аналитические микросистемы: химические и биомедицинские сенсоры	2
<b>6 Оптимизация характеристик интегральных датчиков</b>		<b>4</b>

17	Оптимизация конструктивных параметров по динамическому критерию	2
18	Оптимизация отношения сигнал/шум	2
<b>Итого часов:</b>		<b>36</b>

**4.2 Практические занятия:** не предусмотрены

#### 4.3 Лабораторные работы

Неделя семестра	Наименование лабораторной работы	Объем часов	Виды контроля
1—4	Статическое и динамическое моделирование мембран	4	Проверка отчета по лабораторной работе
5—8	Статическое и динамическое моделирование маятников	4	
9—12	Исследование электростатических приводов движения	4	
13—18	Исследование термомеханических процессов в компонентах «объемной» и «поверхностной» микромеханики	6	
<b>Итого часов:</b>		<b>18</b>	

#### 4.4 Самостоятельная работа студента (СРС)

Неделя семестра	Содержание СРС	Виды контроля	Объем часов
2—18	Проработка материала лекций с использованием рекомендуемой литературы	Опрос	24
2—17	Подготовка к лабораторным работам	Ответы на контрольные вопросы	16
6, 12	Подготовка к промежуточным аттестациям	Результаты выполнения задания	6
2—17	Выполнение курсовой работы	Защита курсовой работы	44
<b>Итого часов:</b>			<b>90</b>

### 5. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

**В рамках изучения дисциплины предусмотрены следующие образовательные технологии:**

5.1	Лекции
5.2	Лабораторные работы
5.3	Самостоятельная работа

### 6. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ИТОГАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ И УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

<b>6.1</b>	<b>Контрольные вопросы и задания</b>
6.1.1	Для текущего контроля успеваемости используются контрольные вопросы, помещенные в конце каждой лабораторной работы
6.1.2	В качестве заданий предусмотрены выдаваемые для самостоятельного решения задачи
<b>6.2</b>	<b>Темы письменных работ</b> не предусмотрены
<b>6.3</b>	<b>Другие виды контроля</b> не предусмотрены

Полная спецификация оценочных средств, процедур и контролируемых результатов в привязке к формируемым компетенциям, показателей и критериев оценивания приводится в Фонде оценочных средств по дисциплине, являющемся приложением к рабочей программе.

### 7. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

<b>7.1 Рекомендуемая литература</b>				
<b>№ п/п</b>	<b>Авторы/ составители</b>	<b>Заглавие</b>	<b>Вид и год издания</b>	<b>Обеспеченность</b>
<b>7.1.1 Основная литература</b>				
Л1.1	Распопов В.Я.	Микромеханические приборы. — М.: Машиностроение. 2007. — 400 с.	Учеб. пособие, 2007	1
Л1.2	Варадан В., Виноной К., Джозе К.	ВЧ МЭМС и их применение. — М.: Техносфера, 2004. — 528 с.	Учеб. пособие, 2004	0,2
Л1.3	Тимофеев В.Н.	Техническая механика микросистем. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. 176 с.	Учеб. пособие, 2011	
<b>7.1.2 Дополнительная литература</b>				
Л2.1	Бхушан Б.	Справочник Шпрингера по нанотехнологиям (в 3-х томах). — М.: Техносфера, 2010.	Справочник, 2010	1
Л2.2	Фрайден Дж.	Современные датчики. Справочник. — М.: Техносфера, 2006. 592 с.	Справочник, 2006	1
Л2.3	Джексон Р.	Новейшие датчики. — М.: Техносфера, 2007. — 384 с.	Справочник, 2007	1
Л2.4	Войтович И.Д., Корсунский В.М.	Интеллектуальные сенсоры. — М.: Интернет-Университет Информационных Технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. — 624 с.	Учеб. пособие, 2011	
<b>7.1.3 Методические разработки</b>				
Л3.1	Липатов Г.И.	Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Физические основы нанотехнологии»	Метод. указ., 2019	1
<b>7.1.4 Программное обеспечение и Интернет-ресурсы</b>				
1	Системы компьютерной математики MathCAD, MATLAB			
2	Нано- и микросистемная техника. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <a href="http://www.microsystems.ru">http://www.microsystems.ru</a> . An information portal for the MEMS and Nanotechnology community [Электронный ресурс]. Режим доступа: <a href="http://www.memsnet.org">http://www.memsnet.org</a> . Новости МЭМС и нанотехники [Электронный ресурс]. Режим доступа: <a href="http://www.smalltimes.com">www.smalltimes.com</a> .			

## **8. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

8.1	Учебный компьютерный класс, оснащенный компьютерными программами для выполнения расчетов, и рабочими местами для самостоятельной подготовки обучающихся с выходом в Интернет
8.2	Контрольно-измерительное оборудование
8.3	Презентации и учебные видеофильмы

## **9. СТРУКТУРА И СОСТАВ ФОНДОВ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

Фонды оценочных средств по дисциплине представляют собой: перечень вопросов для рейтинговых и контрольных мероприятий, а также варианты вопросов, выносимых на экзамен.

### **9.1. Перечень вопросов для рейтинговых и контрольных мероприятий**

1. Основные факторы развития микросистемной техники?
2. Как влияют компоненты микросистемной техники на характеристики измерительных и исполнительных средств нового поколения?
3. Преимущества устройств на базе МЭМС/НЭМС.
4. Опишите основные характеристики сенсоров.

5. Какими факторами определяется погрешность измерений сенсоров?
6. Какого рода погрешность можно устранить с помощью калибровки сенсора?
7. Основные конструктивные варианты элементов микромеханических сенсоров. Дайте характеристику их свойств.
8. Какие физические механизмы определяют проявление пьезоэффекта?
9. Каков принцип действия и область применения емкостных сенсоров?
10. Опишите область применения, конструктивные особенности тензорезисторов.
11. Опишите принцип действия датчика давлений. Для чего применяется мостовая измерительная схема?
12. Какие физические механизмы определяют проявление обратного пьезоэффекта?
13. Какие механизмы активации используют для создания устройств микросмещения и микропозиционирования? Каковы конструктивные особенности этих устройств?
14. Математическое описание чувствительного элемента как динамической системы.
15. Упругие подвесы и мембраны.
16. Объясните влияние перфорации подвижных узлов на абсолютный коэффициент газодинамического демпфирования.
17. Емкостные преобразователи перемещений.
18. Измерительные свойства микромеханических устройств.
19. Уравнение движения и передаточная функция МЭМС-датчика ускорения.
20. Объясните влияние перфорации подвижных узлов на абсолютный коэффициент газодинамического демпфирования.
21. Почему рекомендуется применять в качестве газа заполнения в интегральных датчиках нейтральный газ (сухой азот)?
22. Электростатические приводы.
23. Тензорезистивные преобразователи деформаций.
24. Преобразователи деформаций на поверхностно-акустических волнах.
25. Конструкции и принцип действия МЭМС-ключей.
26. Основное конструктивно-топологическое отличие элементов микроэлектроники и микросистемной техники?
27. Основные технологические процессы, используемые в микросистемной технике.
28. Назовите сходные черты и различие технологических процессов микроэлектроники и микромеханики.
29. Опишите основные операции и область применения технологии с использованием «жертвенного» слоя.
30. Опишите основные операции и область применения технологий анизотропного жидкостного и глубокого реактивно-ионного травления.

## **9.2. Тематика курсовых работ**

1. Пьезорезистивные датчики давления.
2. Ёмкостные датчики давления.
3. Емкостные микроакселерометры.
4. Замкнутые микроакселерометры.
5. Пьезорезистивные микроакселерометры.
6. Резонирующие микроакселерометры.
7. Акустические сенсоры. TSM, APM, SAW, FPW структуры.
8. Явления переноса в текучих средах и использование их в микросистемной технике.
9. Особенности электромеханических взаимодействий в МЭМС с непараллельными электродами.
10. Тензорезистивные преобразователи давления на основе сложнопрофилированных кремниевых мембран.
11. Электростатические вибрационные генераторы энергии.

## 9.2. Примерные варианты экзаменационных билетов

### Билет № 1

1. Математическое описание чувствительного элемента как динамической системы.
2. Определение добротности интегральных чувствительных элементов.

### Билет № 2

1. Особенности микросистемных чувствительных элементов датчиков линейных ускорений.
2. Упругие подвесы и мембраны.

### Билет № 3

1. Особенности конструкции чувствительных элементов МЭМС-гироскопов.
2. Емкостные преобразователи перемещений.

### Билет № 4

1. Микроэлектронные преобразователи и узлы, встраиваемые в интегральные датчики ускорений.
2. Измерительные свойства микромеханических устройств.

### Билет № 5

1. Уравнение движения и передаточная функция микромеханического датчика ускорения.
2. Электростатические приводы.

### Билет № 6

1. Уравнение движения и передаточная функция микромеханического датчика угловой скорости.
2. Пьезоприводы.

### Билет № 7

1. Особенности газодинамического демпфирования микромеханических акселерометров.
2. Формирование информации об измеряемом ускорении.

### Билет № 8

1. Тензорезистивные преобразователи деформаций.
2. Базовые технологии формообразования элементов МЭМС.

### Билет № 9

1. Теория многомерных упругих подвесов, требования к их структуре и параметрам.
2. Уравнение движения и передаточная функция микродатчика давления.

### Билет № 10

1. Сравнительный анализ различных конструктивных схем инерциальных измерителей.
2. Преобразователи деформаций на поверхностно-акустических волнах.

**«УТВЕРЖДАЮ»**

Председатель ученого совета ФРТЭ

\_\_\_\_\_ В.А. Небольсин

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

**Лист регистрации изменений (дополнений) УМКД  
«Физические основы наноинженерии»**

В УМКД вносятся следующие изменения (дополнения):

---

---

---

---

---

---

Изменения (дополнения) в УМКД обсуждены на заседании кафедры полупроводниковой электроники и наноэлектроники.

Протокол № \_\_\_\_\_ от « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

Зав. кафедрой ППЭНЭ

С.А. Рембеза

Изменения (дополнения) рассмотрены и одобрены методической комиссией ФРТЭ

Председатель методической комиссии ФРТЭ

Е.Н.Коровин

«Согласовано»

С.А. Рембеза

## Карта обеспеченности рекомендуемой литературой

№ п/п	Авторы/ составители	Заглавие	Вид и годы издания	Обеспе- ченность
<b>1. Основная литература</b>				
<b>2. Дополнительная литература</b>				
Л2.1	Бхушан Б.	Справочник Шпрингера по нанотехнологиям (в 3-х томах). — М.: Техносфера, 2010.	Справоч- ник, 2010	1
Л2.2	Фрайден Дж.	Современные датчики. Справочник. — М.: Тех- носфера, 2006. — 592 с.	Справоч- ник, 2006	1
Л2.3	Джексон Р.	Новейшие датчики. — М.: Техносфера, 2007. — 384 с.	Справоч- ник, 2007	1
<b>3. Методические разработки</b>				

Зав. кафедрой ППЭНЭ

С.И. Рембеза

Зам. директора НТБ

Т.И. Буковшина