

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
(ВлГУ)



А.А.Панфилов

« 20 15 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**  
**МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

(наименование дисциплины)

Направление подготовки: 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника»

Профиль/программа подготовки:

Уровень высшего образования: бакалавриат

Форма обучения: очная

Семестр	Трудоемкость зач. ед./ час.	Лекции, час.	Практич. занятия, час.	Лаборат. работы, час.	СРС, час.	Форма промежуточного контроля (экз./зачет)
6	5 ЗЕ / 180 час.	36	18		81	Экзамен (45)
Итого	5 ЗЕ / 180 час.	36	18		81	Экзамен (45)

Владимир 201\_5

## 1. ЦЕЛИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

**Целью** освоения дисциплины «Микроэлектромеханические системы» является приобретение студентами знаний об элементах микросистемной техники, характеристиках, особенностях применения и технологических процессах их изготовления.

### **Задачи дисциплины:**

- изучение основных типов конструкций компонентов микроэлектромеханических систем;
- ознакомление с основными технологическими операциями производства микросистем;
- ознакомление с методами проектирования микроэлектромеханических систем.

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОПОП ВО

Дисциплина «Микроэлектромеханические системы» относится к обязательным дисциплинам вариативной части блок Б1 ОПОП подготовки бакалавров по направлению «Нанотехнологии и микросистемная техника».

Дисциплина изучается в 6 семестре и требует освоения следующих курсов:

- физика;
- информатика;
- физические основы микро- и наносистемной техники;
- прикладная механика/

Знания, полученные в рамках изучения данной дисциплины, могут быть применены при изучении других специальных дисциплин по профилю подготовки, а также при выполнении выпускной квалификационной работы.

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

В результате освоения дисциплины частично формируются следующие компетенции:

- ПК-10, способностью осознавать социальную значимость своей будущей профессии, обладать высокой мотивацией к выполнению профессиональной деятельности В результате освоения дисциплины обучающийся должен демонстрировать следующие результаты образования.

### 1) Знать:

- классификацию элементов и устройств микросистемной техники (ПК-10);
- принципы и особенности функционирования микросистем (ПК-10);
- материаловедческую базу микросистемной техники (ПК-10);
- технологические процессы производства компонентов микросистемной техники (ПК-10).

### 2) Уметь:

- использовать программное обеспечение для разработки и моделирование устройств на основе микросистем (ПК-10).

### 3) Владеть:

- навыками работы с отдельными компонентами микросистемной техники (ПК-10);
- навыками применения компонентов микросистемной техники при создании технических систем различного функционального назначения (ПК-10).

## 4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Общая трудоемкость дисциплины составляет 5 зачетных единиц, 180 часов.

№ п/п	Раздел (тема) дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)						Объем учебной работы, с применением интерактивных методов (в часах / %)	Формы текущего контроля успеваемости (по неделям семестра), форма промежуточной аттестации (по семестрам)
				Лекции	Практические занятия	Лабораторные работы	Контрольные работы	СРС	КП/КР		
1	Общие положения	6	1-2	4	2	-	-	4	-	2 / 33,3%	Рейтинг-контроль №1 (6-я неделя, на практическом занятии),
2	Элементы микроэлектромеханических систем	6	3-5	6	4	-	-	10	-	6 / 60%	
3	Сенсорные компоненты микроэлектромеханических систем	6	6-9	8	4	-	-	19	-	6 / 50%	
4	Актуаторные элементы микроэлектромеханических систем	6	10-13	8	4	-	-	20	-	8 / 66,6%	Рейтинг-контроль №2 (12-я неделя, на практическом занятии), выполнение заданий на практических занятиях
5	Технологические процессы производства микроэлектромеханических систем	6	14-18	10	4	-	-	28	-	10 / 71,4%	Рейтинг-контроль №3 (18-я неделя, на практическом занятии), выполнение заданий на практических занятиях
<b>Всего</b>		<b>6</b>	<b>18</b>	<b>36</b>	<b>18</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>81</b>		<b>32 / 59,2%</b>	<b>экзамен (45 час.)</b>

### Темы лекций.

#### Раздел 1. Параметры и характеристики микроэлектромеханических систем.

- 1.1. Введение, общие положения. Термины, определения, буквенные обозначения параметров и характеристик микроэлектромеханических систем;
- 1.2. Классификация микроэлектромеханических систем;
- 1.3. Методы построения электронных средств с использованием микроэлектромеханических систем.

#### Раздел 2. Элементы микроэлектромеханических систем.

- 2.1. Пьезорезистивные чувствительные элементы. Емкостные чувствительные элементы. Пьезоэлектрические чувствительные элементы;
- 2.2. Резонансные чувствительные элементы. Чувствительные элементы на поверхностных акустических волнах (ПАВ).

#### Раздел 3. Сенсорные компоненты микроэлектромеханических систем.

- 3.1. Пьезоэлектрические датчики. Датчики магнитного поля, температуры, давления;
- 3.2. Сенсоры угловых скоростей. Микроэлектромеханический гироскоп LL-типа, RR-типа;
- 3.3. Сенсоры линейных ускорений. Микромеханические акселерометры L-типа, R-типа. Маятниковый и осевой акселерометр.

#### Раздел 4. Актуаторные элементы микроэлектромеханических систем.

- 4.1. Микромеханические ключи. Интегральные микрозеркала. Устройство DLP;
- 4.2. Электростатические микродвигатели. Пьезоэлектрические микродвигатели;

4.3. Индуктивные элементы микросистем. Спиральные индукторы. Соленоидные индукторы.

#### **Раздел 5. Технологические процессы производства микроэлектромеханических систем.**

- 4.1. Основные операции производства микроэлектроники;
- 4.2. Микролитография;
- 4.3. Объёмная и поверхностная микротехнология;
- 4.4. LIGA процесс, бондинг процесс;
- 4.5. Получение пористого кремния, золь-гель технология.

#### **Практические занятия**

Тема 1. Системы автоматизации проектирования микросистем(2 ч.)

Тема 2. Принцип действия механического датчика давления (2 ч).

Тема 3. Основы инерционной навигации, определение положения объекта с помощью микроэлектромеханического акселерометра, гироскопа и магнитометра (4 ч).

Тема 4. Теоретические и технологические основы процесса фотолитографии (4 ч).

### **5. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

В рамках лекционного курса:

#### **5.1. Активные и интерактивные формы обучения**

С целью формирования и развития профессиональных навыков студентов в учебном процессе используются активные и интерактивные формы проведения занятий в сочетании с внеаудиторной работой: (контрольные аудиторские работы, индивидуальные домашние работы).

#### **5.2. Самостоятельная работа студентов**

Самостоятельная (внеаудиторная) работа студентов включает закрепление теоретического материала при подготовке к выполнению индивидуальной домашней работы по практическим занятиям. Основа самостоятельной работы - изучение литературы по рекомендованным источникам и конспекту лекций, решение выданных преподавателем практики задач, подготовка к экзамену.

#### **5.3. Мультимедийные технологии обучения**

Некоторые из лекционных и практических занятий проводятся в виде презентаций в мультимедийной аудитории (например, ауд. 430-3) с использованием компьютерного проектора.

#### **5.4. Рейтинговая система обучения**

Рейтинг-контроль проводится три раза за семестр. Он предполагает оценку суммарных баллов по следующим составляющим: баллы на контрольных занятиях; качество выполнения домашних типовых заданий, рассматриваемых на практических занятиях. Распределение баллов по контрольным мероприятиям определяется лектором, ведущим дисциплину.

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

Текущий контроль успеваемости проводится по всем видам занятий с использованием балльно-рейтинговой системы.

### **6.1 . Экзаменационные вопросы**

1. Основные понятия и определения микромеханического устройства.
2. Применение МЭМС в автомобильной техники, в области медицины, в бытовой технике.
3. Классификация МЭМС.
4. Классификация сенсоров по назначению, физико-химическим принципам действия, основным характеристикам и техническому назначению.
5. Тензорезистивный мост и принцип работы сенсора давления на его основе. Сдвиговый тензорезистивный эффект.
6. Эффект Холла и его применение в сенсорах магнитного поля. Эффект магнитного сопротивления. Принцип действия магнитодиодов и магнитотранзисторов.
7. Сенсор давления на сдвиговом тензорезистивном эффекте.
8. Сенсоры температуры: основные виды, принципы действия, метрологические характеристики, применение.
9. Акселерометры: виды, конструкция, принцип действия и применение.
10. Основные характеристики микромеханических акселерометров.
11. Гироскопы: виды, конструкция, принцип действия и применение.
12. Основные характеристики микромеханических гироскопов.
13. Актюаторные элементы и основы их работы.
14. Устройства матрицы микрозеркал и принцип её работы.
15. Принцип действия и конструкция датчиков давления.
16. Принцип действия и конструкция пирометров.
17. Принцип действия и конструкция микромеханических микрофонов.
18. Микромагнитные электромеханические системы.
19. Системы автоматизированного проектирования МЭМС
20. Кремний. Монокристаллический и поликристаллический кремний. Кремний *p*- и *n*-типа.
21. Основные этапы получение кремния. Выращивание электронного кремния по методу Чохральского.
22. Основные операции производства микроэлектроники;
23. Микролитография;
24. Объёмная имикротехнология;
25. Поверхностная микротехнология
26. Рентгеновская литография и LIGA-процесс.
27. Бондинг процесс;
28. Специальные технологии получения сенсоров: жидкостное травление кремния, клеевое соединение, пайка с применением легкоплавких стекол и сплава «золото-кремний».
29. Получение пористого кремния,
30. Золь-гель технология.

### **6.2. Вопросы рейтинг-контроля**

#### **Рейтинг-контроль № 1**

1. Классификация сенсоров по назначению, физико-химическим принципам действия, основным характеристикам и техническому назначению;

2. Пьезорезистивные чувствительные элементы;
  3. Емкостные чувствительные элементы;
  4. Пьезоэлектрические чувствительные элементы;
  5. Резонансные чувствительные элементы;
  6. Чувствительные элементы на поверхностных акустических волнах (ПАВ);
  7. Тензорезистивный мост и принцип работы сенсора давления на его основе.
- Сдвиговой тензорезистивный эффект;
8. Пьезоэлектрические датчики;
  9. Датчики температуры;
  10. Датчики давления.

### **Рейтинг-контроль № 2**

1. Датчики магнитного поля
2. Микромеханические акселерометры L-типа, R-типа
3. Маятниковый и осевой акселерометр
4. Гироскопы: виды, конструкция, принцип действия и применение.
5. Микроэлектромеханический гироскоп LL-типа, RR-типа;
6. Устройства матрицы микрозеркал и принцип её работы.
7. Конструкция и принцип действия детекторов теплового излучения.
8. Эффект Холла и его применение в сенсорах магнитного поля. Принцип действия магнитодиодов и магнитотранзисторов.
9. Классические и микроминиатюрные термоанемометры, их конструкции и принципы действия.
10. Микрофазовращатели: разновидности и ограничения. Элементы линий передач в микросистемах, их разновидности и предназначение.

### **Рейтинг-контроль № 3**

1. Кремний. Монокристаллический и поликристаллический кремний. Кремний *p*- и *n*-типа;
2. Основные этапы получение кремния. Выращивание электронного кремния по методу Чохральского;
3. Основные технологические процессы микроэлектроники;
4. Основные операции изготовления микроэлектромеханических системам;
5. Фотолитография, ее физические ограничения. Рентгеновская литография и LIGA-процесс;
6. Специальные технологии получения сенсоров;
7. Объёмная микротехнология;
8. Поверхностная микротехнология.

### **6.3. Вопросы к самостоятельной работе студента**

Самостоятельная работа студентов включает освоение материалов, слабо освещённых в рамках лекционного курса, подготовку к практическим занятиям, подготовку к рейтинг-контролю и экзамену. Контроль выполнения самостоятельной работы осуществляется на практических занятиях. Открытый список вопросов:

1. Принципы миниатюризации технических систем.
2. Электромеханические источники для МЭМС. Термогенераторы
3. Детекторы теплового излучения, их классификация и применение. Конструкция и принцип действия детекторов теплового излучения.
4. Классические и микроминиатюрные термоанемометры, их конструкции и принципы действия.
5. Детекторы изменения скорости потока газа: физический принцип работы. Ультразвуковые и электромагнитные расходомеры.

6. Микрофазовращатели: разновидности и ограничения. Элементы линий передач в микросистемах, их разновидности и предназначение.
7. Источники электрической энергии для МЭМС на основе преобразования энергии излучения.
8. Химические источники электрической энергии для МЭМС. Ионно-литиевые батареи. Топливные элементы.
9. Тенденции развития источников питания автономных МЭМС.
10. Кремниевая технология МЭМС. Процессы нанесения и удаления слоев в кремниевой технологии
11. Совместимость технологии микросистемной техники с технологией микроэлектроники.
12. Изготовление кремниевых пластин для интегральных схем.
13. Окисление кремния. Свойства двуоксида кремния.
14. Металлизация в технологии изготовления интегральных схем.
15. Технология соединения элементов конструкции микросхем.
16. Основы процесса газовой эпитаксии.
17. Основы процесса молекулярно-лучевой эпитаксии.
18. Основы процесса термического окисления.
19. Основы процесса термической диффузии.
20. Основы процесса ионной имплантации.
21. Основы процесса плазмохимического травления
22. Основы процесса вакуумного напыления.
23. Основы процесса осаждения из газовой фазы
24. Фотолитография, ее физические ограничения.
25. Электронно-лучевая литография, изготовление фотошаблонов.
26. MEMS Pro для моделирования воздействия внешней среды на ИС и МЭМС.
27. Измерения и испытания МЭМС.
28. Самотестирование в МЭМС

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

### **а) основная литература:**

1. Мухуров Н.И. Электромеханические микроустройства / Мухуров Н.И., Ефремов Г.И.— Минск: Белорусская наука, 2012.— 258 с.
2. Нанотехнологии в электронике. Выпуск 2. Под редакцией чл.-корр. РАН Ю.А. Чаплыгина. - Москва: Техносфера, 2013. - 688с. - ISBN 978-5-94836-353-0.
3. Тимофеев В. Н. Техническая механика микросистем: учебное пособие / В.Н. Тимофеев [и др.]. - 4-е изд. (эл.). - М. : БИНОМ, 2015. - ISBN 978-5-9963-3001-0.

### **б) дополнительная литература:**

1. Нарайкин О. С. Введение в микросистемную технику : учеб. Пособие / О. С. Нарайкин, К. Г. Потловский, В. В. Холевин. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011
2. Потловский К. Г. Нанотехнологии и микромеханика : учеб. пособие : Ч. 6 : Базовые технологические процессы микросистемной техники / К.Г. Потловский, Е.А. Скороходов, С.А. Козубняк. - М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2013. - 64, [4] с. : ил. ISBN 978-5-7038-3729-0

3. Головин Ю.И. Введение в нанотехнику. - М.: Машиностроение, 2007. - 496 с.: ил. - ISBN 978-5-217-03378-2

**в) периодические издания:**

1. Нано- и микросистемная техника, ISSN 1684-6419

**г) интернет-ресурсы:**

1. Онлайн курс «Design and Fabrication of Microelectromechanical Devices» (Massachusetts Institute of Technology – MIT): <http://ocw.mit.edu/courses/electrical-engineering-and-computer-science/6-777j-design-and-fabrication-of-microelectromechanical-devices-spring-2007/lecture-notes/>
2. Онлайн лекции «МЭМС» (University of Minnesota): <http://me.umn.edu/courses/me8254/lectnotes.html>
3. курс видео-лекций по проектированию МЭМС (VLSI Academy): <http://www.vlsiacademy.org/mems1.html>
4. Видео лекции «MEMS & Microsystems (National Programme on Technology Enhanced Learning (NPTEL))»: <http://www.nptelvideos.in/2012/12/mems-microsystems.html>
5. Конспект лекций «Компоненты МЭМС» (Сибирский федеральный университет): [http://files.lib.sfu-kras.ru/ebibl/umkd/115/u\\_lectures.pdf](http://files.lib.sfu-kras.ru/ebibl/umkd/115/u_lectures.pdf)


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


Материально-техническое обеспечение дисциплины включает:

- кафедральные мультимедийные средства (ауд. 430-3);
- электронные записи лекций.



Рабочая программа дисциплины составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению 28.03.01 Нанотехнологии и микросистемная техника

Рабочую программу составил доцент каф. ФиПМ Золотов А.Н.   
(ФИО, подпись)

Рецензент  
(представитель работодателя) д.с.м.с. каф. радио-технологий РКП "ТМТ Сагун"   
(место работы, должность, ФИО, подпись)  
Дмитриев А.А.

Программа рассмотрена и одобрена на заседании кафедры ФиПМ

Протокол № 11 от 07.04.15 года

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_  
(ФИО, подпись)

Рабочая программа рассмотрена и одобрена на заседании учебно-методической комиссии направления \_\_\_\_\_

Протокол № 11 от 07.04.15 года

Председатель комиссии \_\_\_\_\_  
(ФИО, подпись)

### ЛИСТ ПЕРЕУТВЕРЖДЕНИЯ РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЫ ДИСЦИПЛИНЫ

Рабочая программа одобрена на \_\_\_\_\_ учебный год  
Протокол заседания кафедры № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ года  
Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_

Рабочая программа одобрена на \_\_\_\_\_ учебный год  
Протокол заседания кафедры № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ года  
Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_

Рабочая программа одобрена на \_\_\_\_\_ учебный год  
Протокол заседания кафедры № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ года  
Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_