

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

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по ОД

А.А. Панфилов

« 02 » 09 2019 г.



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

(наименование дисциплины)

Направление подготовки: 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника»

Профиль/программа подготовки: Нанотехнологии и микросистемная техника

Уровень высшего образования: бакалавриат

Форма обучения: очная

Семестр	Трудоемкость зач. ед./ час.	Лекции, час.	Практич. занятия, час.	Лаборат. работы, час.	СРС, час.	Форма промежуточной аттестации (экз./зачет/зачет с оценкой)
6	4 / 144	36	18		54	Экзамен (36)
Итого	4 / 144	36	18		54	Экзамен (36)

Владимир 2019

## 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 микроэлектро-механических 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 базовой части 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

Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения ОПОП

Код формируемых компетенций	Уровень освоения компетенции	Планируемые результаты обучения по дисциплине характеризующие этапы формирования компетенций (показатели освоения компетенции)
1	2	3
ОПК-5 Способен принимать обоснованные технические решения в профессиональной деятельности, выбирать эффективные и безопасные технические средства и технологии	Частичное	<b>знать:</b> перечень оборудования на производстве и в лаборатории, обеспечивающего безопасное производство при производстве и исследовании материалов и компонентов нано- и микросистемной техники; основы нанобезопасности; <b>уметь:</b> оценивать по критериям эффективности и безопасности технические решения по технологии и применению материалов и компонентов нано- и микросистемной техники; <b>владеть:</b> методами анализа и контроля наноструктурированных материалов и систем;
ОПК-7 Способен проектировать и сопровождать производство технических объектов, систем и процессов в области нанотехнологий и микросистемной техники	Частичное	<b>знать:</b> прикладные программы и средства автоматизированного проектирования, используемые при решении инженерных задач; <b>уметь:</b> проектировать и сопровождать производство технических объектов, систем и процессов; <b>владеть:</b> методиками организации работы персонала, соблюдения технологической и трудовой дисциплины;

## 4. ОБЪЕМ И СТРУКТУРА ДИСЦИПЛИНЫ

Общая трудоемкость дисциплины составляет 5 зачетных единиц, 180 часов.

№ п/п	Наименование тем и/или разделов/тем 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, форма промежуточной аттестации (по семестрам)
				Лекции	Практические занятия	Лабораторные работы	СРС		
1.	Параметры и характеристики микроэлектромеханических систем	6	1-2	4	4	-	4	2 / 11%	Рейтинг-контроль №1
2.	Элементы микроэлектромеханических систем	6	3-5	8	4	-	10	4 / 22%	
3.	Сенсорные компоненты микроэлектромеханических систем	6	6-9	8	6	-	10	4 / 22%	
4.	Актуаторные элементы микроэлектромеханических систем	6	10-13	8	-	-	15	4 / 22%	Рейтинг-контроль №2
5.	Технологические процессы производства микроэлектромеханических систем	6	14-18	8	4	-	15	4 / 22%	Рейтинг-контроль №3
Наличие в дисциплине КП/КР		-	-	-	-	-	-	-	-
Итого по дисциплине		6	18	36	18	-	54	32/59	экзамен (36 час.)

### Содержание лекционных занятий по дисциплине

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

Тема 1. Введение, общие положения. Термины, определения, буквенные обозначения параметров и характеристик микроэлектромеханических систем;

Тема 2. Классификация микроэлектромеханических систем;

Тема 3. Методы построения электронных средств с использованием микроэлектромеханических систем.

#### Раздел 2. Элементы микроэлектромеханических систем.

Тема 1. Пьезорезистивные чувствительные элементы. Емкостные чувствительные элементы. Пьезоэлектрические чувствительные элементы;

Тема 2. Резонансные чувствительные элементы. Чувствительные элементы на поверхностных акустических волнах (ПАВ).

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

Тема 1. Пьезоэлектрические датчики. Датчики магнитного поля, температуры, давления;

Тема 2. Сенсоры угловых скоростей. Микроэлектромеханический гироскоп LL-типа, RR-типа;

Тема 3. Сенсоры линейных ускорений. Микромеханические акселерометры L-типа, R-типа. Маятниковый и осевой акселерометр.

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

Тема 1. Микромеханические ключи. Интегральные микрозеркала. Устройство DLP;

Тема 2. Электростатические микродвигатели. Пьезоэлектрические микродвигатели;

Тема 3. Индуктивные элементы микросистем. Спиральные индукторы. Соленоидные индукторы.

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

Тема 1. Основные операции производства микроэлектроники;

Тема 2. Микролитография;

Тема 3. Объемная и поверхностная микротехнология;

Тема 4. LIGA процесс, бондинг процесс;

Тема 5. Получение пористого кремния, золь-гель технология.

### Содержание практических занятий по дисциплине

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

Тема 1. Физические эффекты в НЭМС/МЭМС датчиках.

Тема 2. Характеристики и параметры МЭМС датчиков.

Раздел 2. Элементы микроэлектромеханических систем.

Тема 1. Расчет коэффициенты жесткости балок.

Тема 2. Расчет Коэффициенты демпфирования.

Раздел 3. Сенсорные компоненты микроэлектромеханических систем.

Тема 1. Основы инерционной навигации, определение положения объекта с помощью микроэлектромеханического акселерометра, гироскопа и магнитометра.

Раздел 5. Технологические процессы производства микроэлектромеханических систем.

Тема 1. Топологическое проектирование МЭМС.

## **5. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

В преподавании дисциплины «Микроэлектромеханические системы» используются разнообразные образовательные технологии как традиционные, так и с применением активных и интерактивных методов обучения.

Активные и интерактивные методы обучения:

*Интерактивная лекция (тема № 1)*

*Групповая дискуссия (темы №2-5)*

Интерактивные лекционные и практические занятия проводятся в виде презентаций в мультимедийной аудитории (например, ауд. 430-3) с использованием компьютерного проектора.

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

### **а) Вопросы рейтинг-контроля:**

#### **Примерные вопросы к рейтинг-контролю №1**

Классификация сенсоров по назначению, физико-химическим принципам действия, основным характеристикам и техническому назначению. Пьезорезистивные чувствительные элементы. Емкостные чувствительные элементы. Пьезоэлектрические чувствительные элементы. Резонансные чувствительные элементы. Чувствительные элементы на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Тензорезистивный мост и принцип работы сенсора давления на его основе. Сдвиговый тензорезистивный эффект. Пьезоэлектрические датчики. Датчики температуры. Датчики давления.

#### **Примерные вопросы к рейтинг-контролю №2**

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

#### **Примерные вопросы к рейтинг-контролю №3**

Кремний. Монокристаллический и поликристаллический кремний. Кремний p- и n-типа. Основные этапы получение кремния. Выращивание электронного кремния по методу Чохральского. Основные технологические процессы микроэлектроники. Основные операции изготовления микроэлектромеханических систем. Фотолитография, ее физические ограничения. Рентгеновская литография и LIGA-процесс. Специальные технологии получения сенсоров. Объемная микротехнология. Поверхностная микротехнология.

## **б) Вопросы к экзамену**

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 р- и п-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.

## **в) Вопросы для самостоятельной работы студента**

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

Фонд оценочных средств для проведения аттестации уровня сформированности компетенций обучающихся по дисциплине оформляется отдельным документом.

## 7. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### 7.1 Книгообеспеченность

Наименование литературы: автор, название, вид издания, издательство	Год издания	КНИГООБЕСПЕЧЕННОСТЬ	
		Количество экземпляров изданий в библиотеке ВлГУ в соответствии с ФГОС ВО	Наличие в электронной библиотеке ВлГУ
Основная литература			
1. Войтович И.Д. Интеллектуальные сенсоры [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Войтович И.Д., Корсунский В.М.— Электрон. текстовые данные.— Москва, Саратов: Интернет-Университет Информационных Технологий (ИНТУИТ), Ай Пи Ар Медиа, 2020.— 1163 с.	2020		<a href="http://www.iprbookshop.ru/89436.html">http://www.iprbookshop.ru/89436.html</a>
2. Электромеханические переходные процессы в электрических системах [Электронный ресурс] : сборник задач / Д. В. Армеев, Е. П. Гусев, А. П. Долгов [и др.] ; под ред. В. М. Чебан. — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2010. — 127 с. — 978-5-7782-1388-3	2010		<a href="http://www.iprbookshop.ru/45200.html">http://www.iprbookshop.ru/45200.html</a>

3. Распопов В.Я. Микромеханические приборы: учебное пособие. - М.: Машиностроение, 2007. - 400 с.: ил. - ISBN 5-217-03360-6	2007		<a href="https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN5217033606.html">https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN5217033606.html</a>
<b>Дополнительная литература</b>			
1. Куликов, К. В. Микроэлектромеханические устройства систем связи : учеб. пособие / К. В. Куликов, В. Н. Ланцов ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2014. – 94 с.	2014		<a href="http://e.lib.vlsu.ru:80/handle/123456789/3547">http://e.lib.vlsu.ru:80/handle/123456789/3547</a>
2. Остертак Д.И., Микроэлектромеханика : учебное пособие / Остертак Д.И. - Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. - 120 с. - ISBN 978-5-7782-2901-3	2016		<a href="https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785778229013.html">https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785778229013.html</a>

## 7.2 ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ:

- <http://www.lib.vsu.ru.ru/>
- <http://www.nanometer.ru/>
- <http://www.nanonewsnet.ru/>
- <http://thesaurus.rusnano.com/>

## 8. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Для реализации данной дисциплины имеются специальные помещения для проведения занятий лекционного типа, занятий практического/лабораторного типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации, а также помещения для самостоятельной работы.

Перечень используемого оборудования:

- 1) Вихретоковый измеритель электропроводности металлов ВЭ-27НЦ/4-5.
- 2) Микротвердомер ПМТ.
- 3) Стационарный твердомер по Роквеллу ТН301.
- 4) Твердомер ультразвуковой (контактно-импедансный) ТКМ-459М.

Практические/лабораторные занятия проводятся в лабораториях физики и компьютерных классах прикладной математики Института прикладной математики, физики и информатики ВлГУ.

Перечень используемого лицензионного программного обеспечения:

- 1) GPSS World Student Version (свободно распространяемое);
- 2) MS Word;
- 3) MS PowerPoint;
- 4) MS Visual Studio.

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). Ин. дир. ООО "Влад.Митех" А.В. Осипов  
(место работы, должность, ФИО, подпись)

Программа рассмотрена и одобрена на заседании кафедры ФиПМ

Протокол №1 от 02.09.2019 года

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ С.М.Аракелян  
(ФИО, подпись)

Рабочая программа рассмотрена и одобрена на заседании учебно-методической комиссии направления 28.03.01 Нанотехнологии и микросистемная техника

Протокол №1 от 02.09.2019 года

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ С.М.Аракелян  
(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 \_\_\_\_\_