

**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)**

Институт прикладной математики, физики и информатики
(Наименование института)

УТВЕРЖДАЮ:

Директор института

_____ К.С. Хорьков

_____ 08 _____ 2021 г.



**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ
МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**
(наименование дисциплины)

направление подготовки / специальность

_____ **28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника»**
(код и наименование направления подготовки (специальности))

направленность (профиль) подготовки

_____ **Нанотехнологии и микросистемная техника**
(направленность (профиль) подготовки)

г. Владимир
Год 2021

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:

- 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

Дисциплина «Микроэлектромеханические системы» относится к обязательным дисциплинам учебного плана.

3. ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения ОПОП (компетенциями и индикаторами достижения компетенций)

| Формируемые компетенции (код, содержание компетенции) | Планируемые результаты обучения по дисциплине, в соответствии с индикатором достижения компетенции | | Наименование оценочного средства |
|---|--|--|---|
| | Индикатор достижения компетенции (код, содержание индикатора) | Результаты обучения по дисциплине | |
| ОПК-5. Способен принимать обоснованные технические решения в профессиональной деятельности, выбирать эффективные и безопасные технические средства и технологии | ОПК-5.1. Знает перечень оборудования на производстве и в лаборатории, обеспечивающего безопасную работу при производстве и исследовании материалов и компонентов нано- и микросистемной техники, основы нанобезопасности. ОПК-5.2. Умеет оценивать по критериям эффективности и безопасности технические решения по технологии и применению материалов и компонентов нано- и микросистемной техники. ОПК-5.3. Владеет методами анализа и контроля наноструктурированных материалов и систем. | знать: перечень оборудования на производстве и в лаборатории, обеспечивающего безопасное производство при производстве и исследовании материалов и компонентов нано- и микросистемной техники; основы нанобезопасности; уметь: оценивать по критериям эффективности и безопасности технические решения по технологии и применению материалов и компонентов нано- и микросистемной техники; владеть: методами анализа и контроля наноструктурированных материалов и систем; | Тестовые вопросы Ситуационные задачи Практико-ориентированное задание |
| ОПК-7. Способен проектировать и сопровождать производство технических объектов, систем и процессов в области нанотехнологий и микросистемной техники | ОПК-7.1. Знает прикладные программы и средства автоматизированного проектирования, используемые при решении инженерных задач. ОПК-7.2. Умеет проектировать и сопровождать производство технических объектов, систем и процессов. ОПК-7.2. Владеет методиками организации работы персонала, соблюдения технологической и трудовой дисциплины. | знать: прикладные программы и средства автоматизированного проектирования, используемые при решении инженерных задач; уметь: проектировать и сопровождать производство технических объектов, систем и процессов; владеть: методиками организации работы персонала, соблюдения технологической и трудовой дисциплины; | Тестовые вопросы Ситуационные задачи Практико-ориентированное задание |

4. ОБЪЕМ И СТРУКТУРА ДИСЦИПЛИНЫ

Трудоемкость дисциплины составляет 4 зачетных единиц, 144 часов

Тематический план

форма обучения – очная

| № п/п | Наименование тем и/или разделов/тем дисциплины | Семестр | Неделя семестра | Контактная работа обучающихся с педагогическим работником | | | | Самостоятельная работа | Формы текущего контроля успеваемости, форма промежуточной аттестации (по семестрам) |
|----------------------------|---|---------|-----------------|---|----------------------|---------------------|----------------------|------------------------|---|
| | | | | Лекции | Практические занятия | Лабораторные работы | в форме практической | | |
| 1 | Параметры и характеристики микроэлектромеханических систем | 6 | 1-2 | 4 | 4 | - | - | 4 | |
| 2 | Элементы микроэлектромеханических систем | 6 | 3-5 | 8 | 4 | - | - | 10 | |
| 3 | Сенсорные компоненты микроэлектромеханических систем | 6 | 6-9 | 8 | 6 | - | - | 10 | Рейтинг-контроль №1 |
| 4 | Актуаторные элементы микроэлектромеханических систем | 6 | 10-13 | 8 | - | - | - | 15 | Рейтинг-контроль №2 |
| 5 | Технологические процессы производства микроэлектромеханических систем | 6 | 14-18 | 8 | 4 | - | - | 15 | Рейтинг-контроль №3 |
| Всего за 6 семестр: | | - | - | 36 | 18 | - | - | 54 | экзамен 36 ч |
| Наличие в дисциплине КП/КР | | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Итого по дисциплине | | - | - | 36 | 18 | - | - | 54 | экзамен 36 ч |

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

5.1. Текущий контроль успеваемости

Примерные вопросы к рейтинг-контролю №1

1. Классификация сенсоров по назначению, физико-химическим принципам действия, основным характеристикам и техническому назначению.
2. Пьезорезистивные чувствительные элементы. Емкостные чувствительные элементы.
3. Пьезоэлектрические чувствительные элементы.
4. Резонансные чувствительные элементы.
5. Чувствительные элементы на поверхностных акустических волнах ПАВ.
6. Тензорезистивный мост и принцип работы сенсора давления на его основе.
7. Сдвиговый тензорезистивный эффект.
8. Пьезоэлектрические датчики.
9. Датчики температуры.
10. Датчики давления.

Примерные вопросы к рейтинг-контролю №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.
9. Принцип действия магнитодиодов и магнитотранзисторов.
10. Классические и микроминиатюрные термоанемометры, их конструкции и принципы действия.
11. Микрофазовращатели: разновидности и ограничения.
12. Элементы линий передач в микросистемах, их разновидности и предназначение.

Примерные вопросы к рейтинг-контролю №3

1. Кремний. Монокристаллический и поликристаллический кремний. Кремний p- и n-типа.
2. Основные этапы получение кремния.
3. Выращивание электронного кремния по методу Чохральского.
4. Основные технологические процессы микроэлектроники.
5. Основные операции изготовления микроэлектромеханических системам.
6. Фотолитография, ее физические ограничения.

7. Рентгеновская литография и LIGA-процесс.
8. Специальные технологии получения сенсоров.
9. Объёмная микротехнология. Поверхностная микротехнология.

5.2. Промежуточная аттестация по итогам освоения дисциплины экзамен.

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 n- типа.
21. Основные этапы получение кремния. Выращивание электронного кремния по методу Чохральского.
22. Основные операции производства микроэлектроники;
23. Микролитография;
24. Объёмная и микротехнология;
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.

5.3. Самостоятельная работа обучающегося.

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 материалов (ФОМ) для проведения аттестации уровня сформированности компетенций обучающихся по дисциплине оформляется отдельным документом.

6. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

6.1. Книгообеспеченность

| Наименование литературы: автор, название, вид издания, издательство | Год издания | КНИГООБЕСПЕЧЕННОСТЬ |
|--|-------------|---|
| | | Наличие в электронном каталоге ЭБС |
| 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 | http://www.iprbookshop.ru/89436.html |
| 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 | http://www.iprbookshop.ru/45200.html |
| 3. Распопов В.Я. Микромеханические приборы: учебное пособие. - М.: Машиностроение, 2007. - 400 с.: ил. - ISBN 5-217-03360-6 | 2007 | https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN5217033606.html |
| Дополнительная литература | | |

| | | |
|--|------|---|
| 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 | http://e.lib.vlsu.ru:80/handle/123456789/3547 |
| 2. Остертак Д.И., Микроэлектромеханика : учебное пособие / Остертак Д.И. - Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. - 120 с. - ISBN 978-5-7782-2901-3 | 2016 | https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785778229013.html |

6.2. Интернет-ресурсы

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

7. 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.

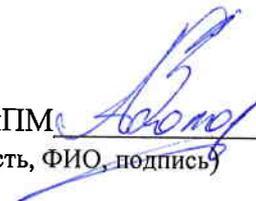
Перечень используемого оборудования:

- 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 занятия проводятся в 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.

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

Рецензент
Генеральный директор ООО «ВладИнТех» _____ А.В. Осипов
(место работы, должность, ФИО, подпись)

Программа рассмотрена и одобрена на заседании кафедры ФиПМ
Протокол №1 от 30.08.2021 года
Заведующий кафедрой _____ С.М. Аракелян
(ФИО, подпись)

Рабочая программа рассмотрена и одобрена
на заседании учебно-методической комиссии направления 28.03.01
Протокол №1 от 30.08.2021 года
Председатель комиссии _____ С.М. Аракелян
(ФИО, должность, подпись)

**ЛИСТ ПЕРЕУТВЕРЖДЕНИЯ
РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЫ ДИСЦИПЛИНЫ**

Рабочая программа одобрена на 20 22 / 20 23 учебный года

Протокол заседания кафедры № 1 от 30.08.2022 года

Заведующий кафедрой _____ *С.И. Абрамкин*

Рабочая программа одобрена на 20 ____ / 20 ____ учебный года

Протокол заседания кафедры № ____ от ____ года

Заведующий кафедрой _____

Рабочая программа одобрена на 20 ____ / 20 ____ учебный года

Протокол заседания кафедры № ____ от ____ года

Заведующий кафедрой _____