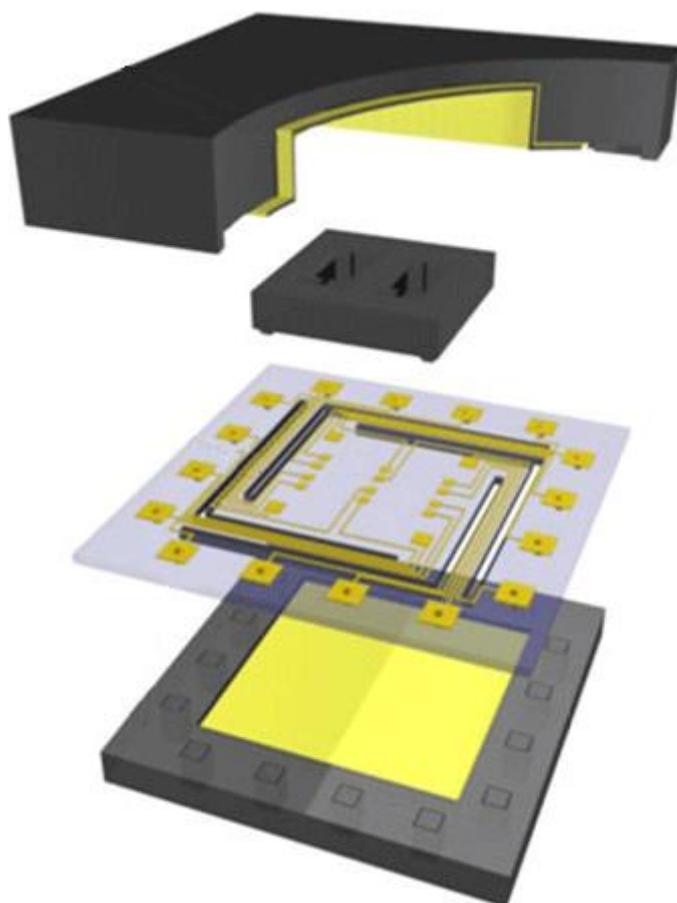


**М.Е. Калинкина, О.И. Пирожникова,
В.Л. Ткалич, А.В. Комарова**

**МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ
СИСТЕМЫ И ДАТЧИКИ**



**Санкт-Петербург
2020**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

**М.Е. Калинин, О.И. Пирожникова,
В.Л. Ткалич, А.В. Комарова**
**МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ
СИСТЕМЫ И ДАТЧИКИ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО
по направлению подготовки 11.04.03 Конструирование и технология
электронных средств

в качестве учебного пособия для реализации основных профессиональных
образовательных программ высшего образования бакалавриата

 УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург
2020

Калинкина М.Е., Пирожникова О.И., Ткалич В.Л., Комарова А.В.,
Микроэлектромеханические системы и датчики– СПб: Университет ИТМО, 2020.
– 75 с.

Рецензент(ы):

Коробейников Анатолий Григорьевич, доктор технических наук, профессор, профессор (квалификационная категория "профессор практики") факультета безопасности информационных технологий, Университета ИТМО.

В учебном пособии рассмотрены вопросы актуальных областей применения МЭМС и датчиков, созданных на основе микротехнологий, основные материалы микросенсорной техники, а также элементная база микромеханических приборов, конструкции и принципы работы микромеханических приборов и их измерительные свойства.

Предназначено для обучения магистров по направлению подготовки 11.04.03 «Конструирование и технология электронных средств» для образовательной программы «Проектирования киберфизических систем защиты информации» по дисциплине «Микроэлектромеханические системы и датчики».



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2020

© Калинкина М.Е., Пирожникова О.И., Ткалич В.Л., Комарова А.В., 2020

Содержание

Введение.....	6
Список сокращений.....	9
1. Сенсорные и актюаторные устройства МЭМС	11
1.1 Сенсорные устройства МЭМС и области их применения.....	11
1.2 Актюаторные устройства МЭМС.....	13
1.3 Датчики на основе МЭМС и их измерительные свойства.....	16
1.4 МЭМС и их технологии в России.....	18
Вопросы и задания для самоконтроля.....	20
2. Анализ конструкций и принципов работы микромеханических датчиков.....	23
2.1 Микромеханические акселерометры.....	23
2.2 Микромеханические гироскопы.....	26
2.3 Микромеханические датчики давления.....	29
2.3.1 Конструкции микромеханических датчиков давления фирмы Motorola.....	32
2.3.2 Принцип работы датчиков давления.....	36
2.3.3 Основные характеристики датчиков давления.....	37

Вопросы и задания для самоконтроля.....	38
3. Технология изготовления микроструктур и устройств МЭМС.....	39
3.1 Объемная микрообработка.....	39
3.2 Поверхностная микрообработка.....	40
3.3 Высокопрофильная микрообработка.....	44
3.4 Другие виды микрообработки.....	47
Вопросы и задания для самоконтроля.....	48
4. Методы анализа МЭМС-устройств.....	49
4.1 Метод аналогий в применении к анализу МЭМС.....	49
4.2 Метод анализа диссипативных процессов в МЭМС структурах.....	54
4.3 Пример метода анализа МЭМС датчиков на основе электрического конденсатора и механической пружины.....	55
Вопросы и задания для самоконтроля.....	56
5. Системы автоматизированного проектирования для МЭМС.....	57
5.1 Компьютерное моделирование МЭМС.....	57
5.1.1 Моделирование в среде COMSOL.....	57
5.1.2 Моделирование в среде SEMulator 3D.....	61

5.2 Особенности автоматизированного проектирования МЭМС.....	62
5.3 Автоматизация процесса проектирования МЭМС.....	63
Вопросы и задания для самоконтроля.....	68
Заключение.....	70
Список литературы.....	71
Приложения.....	73
Приложение 1 – Области применения.....	72

Введение

Данное учебное пособие предназначено для обучения магистров по направлению 11.04.03 «Конструирование и технология электронных средств» для образовательной программы «Проектирование киберфизических систем защиты информации» по дисциплине «Микроэлектромеханические системы и датчики».

В результате изучения магистерской дисциплины «Микроэлектромеханические системы и датчики» и использования данного учебного пособия обучающиеся приобретут знания:

- основных характеристик и измерительных свойств устройств микроэлектромеханических систем (МЭМС);
- конструкционных особенностей, принципов работы, и областей применения МЭМС, в частности микромеханических акселерометров, микромеханических гироскопов, и микромеханических датчиков давления;
- конструкционных материалов и их физико-химических свойств;
- технологии изготовления сенсорных и актюаторных микроструктур и устройств МЭМС;
- методики проектирования на основе математических моделей функционирования;
- методов анализа МЭМС, например, таких как электромеханических аналогий и анализа диссипативных процессов;
- национальных и международных нормативно-правовых документов в области защиты интеллектуальной собственности при выполнении творческой инженерной деятельности;
- систем автоматизированного проектирования и компьютерного моделирования для МЭМС.

При изучении магистерской дисциплины «Микроэлектромеханические системы и датчики» и использования данного учебного пособия для обучающихся могут быть высказаны следующие методические рекомендации по применению разделов данного учебного пособия в данном учебном процессе:

А. При контактной работе на лекциях и при выполнении лабораторных работ можно рекомендовать уделить особое внимание:

- рассмотрению конкретных конструкций микромеханических датчиков фирмы Motorola;
- рассмотрению примеров применения методов электромеханических аналогий и анализа диссипативных процессов для конкретных конструкций устройств МЭМС

Б. При выполнении самостоятельной работы студентов рекомендуется уделить более пристальное внимание:

- Работе с контрольными вопросами и выполнению заданий для самоконтроля в конце каждого из пяти разделов учебного пособия;
- Работе с патентной литературой с целью изучения самостоятельных патентных исследований, по вопросам устройств и способов изготовления МЭМС;
- Особо рекомендуется обратить внимание на изучение устройств и способов приведённых в трех разделах международного патентного классификатора (механика, физика, электричество), в частности, таким классам по МПК (2006) как МПК7 G01 C19/56, МПК7 G01P 9/04, МПК7 G01 P15/08, МПК7 G 01P 15/13 и т.д.

Данное учебное пособие может быть включено в список рекомендуемой учебной литературы и в рабочие программы дисциплин: «Микроэлектромеханические системы и датчики (МЭМС-технологии)» и «Интегрированные технологии микросенсорной техники».

Одним из основных принципов создания интегральных датчиков неэлектрических величин является миниатюризация их массогабаритных параметров при одновременном понижении погрешности и расширении области применения. Для этого требуется разрабатывать новые микросистемные технологии (МСТ) и на их основе создавать МЭМС.

Физические размеры устройств в МЭМС варьируются от 1 микрона до нескольких миллиметров. Они могут представлять собой относительно простые структуры, практически не содержащие движущихся элементов, а могут представлять собой очень сложные электромеханические системы с большим числом подвижных элементов и существенным количеством интегральной микроэлектроники. Однако отличительной чертой всех МЭМС является то, что, по крайней мере, один элемент в них подвижен. Датчики, изготовленные по МЭМС-технологии, имеют широкую область использования в окружающих нас приборах: смартфонах, бытовой технике, охранных системах, автомобильной электронике и системах сигнализации, военной и космической техники, системах

навигации и т.д. Разработчики отдают предпочтение МЭМС-продукции за надежность и высокие технические характеристики.

В настоящем учебном пособии систематизированы работы В.Я. Распопова, А.А. Щука, А.П. Кашкарова, А.Н. Дорохова, В.М. Ачильдиева, Г.Г. Шишкина, Н.К. Юркова, основные сведения об устройствах МЭМС, технологии их изготовления (микрообработки), методах анализа МЭМС и системах их автоматизированного проектирования (САПР).

Учебное пособие разработано в соответствии с актуальными и перспективными направлениями развития в области МЭМС.

Структура и содержание учебного пособия.

Первая глава посвящена сенсорным и актюаторным устройствам МЭМС и областям их применения. Рассмотрены основные виды датчиков на основе МЭМС и их измерительные свойства. Проанализированы перспективы МЭМС технологий в России.

Во второй главе учебного пособия проведён анализ конструкции и принципов работы микромеханических приборов (МПП), а именно, микроакселерометров, микрогироскопов и микродатчиков давления.

Третья глава посвящена технология изготовления микроструктур и устройств МЭМС. Описана объемная, поверхностная, высокопрофильная и другие виды микрообработки.

В четвертой главе рассмотрены методы анализа МЭМС устройств, в частности, метод электромеханических аналогий.

Пятая глава посвящена САПР для МЭМС. Включает компьютерное моделирование МЭМС (моделирование в среде COMSOL и SEMulator-3D). Рассмотрены особенности автоматизированного проектирования МЭМС и сама автоматизация процесса проектирования МЭМС.

После каждой главы приведены вопросы и задания для самоконтроля. Имеется список использованных сокращений, список использованной и рекомендуемой литературы, а также Приложение.

В учебном пособии систематизированы основные сведения о микромеханических системах МЭМС и датчиков на их основе, МЭМС-технологиях, методах анализа МЭМС и САПР данных устройств.

Список сокращений

ИМ – инерционная масса

ИС – инерциальная система

КМОП - комплементарная структура металл-оксид-полупроводник

ММА – микромеханический акселерометр

ММГ – микромеханический гироскоп

ММДД – микромеханические датчики давления

ММП – микромеханические приборы

МОЭМС - микро-оптоэлектромеханические системы

МСТ – микросистемная техника

МЭМС – микроэлектромеханические системы

НиМЭМС – нано- и микроэлектромеханические приборы

ПП - полупроводник

РД – режим движения

РЧ – режим чувствительности

САПР – система автоматизированного проектирования

ФЧХ – фазово-частотная характеристика

ЧЭ – чувствительный элемент

УЭ – упругий элемент

HART - Highway Addressable Remote Transducer

LIGA - Lithography-Galvanik-Abformung

MUMPS - Massachusetts General Hospital Utility Multi-Programming System

1. Сенсорные и актюаторные устройства МЭМС

1.1 Сенсорные устройства МЭМС и области их применения

MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) представляют собой соединение механических элементов, датчиков, а также [1] приводов и электроники на одной кремниевой подложке (основании). МЭМС включает в себя ряд механических микроструктур, в частности микродатчиков, микроактюаторов и микроэлектроники, объединенных на кремниевом чипе. Поэтому МЭМС относятся к интегрированным системам (размер которых составляет от нескольких микрометров до миллиметров), объединяющим в себе механические, а также электрические компоненты.

Для МЭМС понятие «система» относится не только к совокупности датчиков, объединенных информационными каналами, но и к совокупности различных по своей физической природе отдельных компонентов. Главное, чтобы они все вместе выполняли единую функционально-измерительную задачу. Поэтому, с точки зрения интегрирования разнородных компонентов, любой датчик (измерительный прибор или преобразователь) является системой [2].

На сегодняшний день мировой рынок МЭМС является быстрорастущим и динамично меняющимся. Его объём в настоящее время увеличивается на 15,7% каждый год. Компоненты МЭМС и датчики на их основе обладают большой коммерческой привлекательностью. Так, микромеханические приборы выпускают более 50 фирм, при этом прибыль от продаж превышает 10 млрд. долл. США.

В Европе, кроме аббревиатуры МЭМС, используют МСТ - микросистемная технология, в Японии распространен термин «микромашин». В России МСТ – это микросистемная техника. Важно, что все элементы реализуются в виде единого изделия, сразу в большом количестве, благодаря хорошо отработанной групповой технологии производства полупроводниковых интегральных микросхем [3]. Поэтому МЭМС можно рассматривать как множество микроустройств с широким набором вариантов конструкций и назначений, для производства которых применяются технологические приемы современной микроэлектроники.

Электронные устройства используют только технологии интегральных схем, а механические компоненты при их изготовлении базируются на сложных

манипуляциях с подложками и требуют микромеханической обработки. МЭМС подразумевает не только наличие миниатюрных микросхем, но и наличие МСТ. Поэтому только продуманная комбинация компонентов электроники, а также механической и оптической элементной базы может привести к созданию МЭМС. Отсюда следует появление таких направлений, как оптомеханические и оптоэлектронные микросхемы, а на их основе - созданные микрооптоэлектромеханические системы (МОЭМС), которые относятся к подмножеству МСТ и совместно с МЭМС участвуют в формировании новых областей технологии микроэлектроники [2].

Микродатчики находят широкое применение в разнообразных областях, которые, в свою очередь, характеризуются определенными физическими параметрами. Так, можно обозначить несколько групп микродатчиков для измерения магнитных, механических, химических, тепловых, оптических и электрических величин. При этом компонент микроструктуры, реагирующий на изменение измеряемой физической величины, называют первичным преобразователем или чувствительным элементом (ЧЭ). Таким образом, микродатчики относятся к микроструктурам с электроникой, выполненной по технологии МЭМС - снабженным механическими подвижными ЧЭ.

К микродатчикам (микромеханическим приборами) относят [2]:

- микромеханические акселерометры (ММА), в том числе датчики углового положения (ЧЭ – инерционная масса);
- микромеханические датчики давления (ММДД) (ЧЭ – мембранные элементы);
- микромеханические гироскопы (ММГ) (ЧЭ – вибрирующая масса).

Некоторые из областей использования микромеханических приборов приведены [2] в Приложении 1.

Успешная разработка устройств МЭМС требует значительного времени и вложений на создание опытного образца. Чтобы сократить эти затраты, необходимо осуществлять физическое и имитационное моделирование, поэтому разработчики МЭМС должны владеть соответствующим инструментарием, необходимым для точного прогнозирования поведения МЭМС и датчиков на их основе.

1.2 Актюаторные устройства МЭМС

Любой радиочастотный узел МЭМС состоит из актюатора и якоря. Цель актюаторного микромеханизма в преобразовании управляющего электрического сигнала в движение. Якорь представляет собой закрепленную консольно балку (кантилевер) и подвижное коромысло (beam) или мембранный элемент.

К радиочастотным МЭМС-актюаторам относятся ключи, осцилляторы и резонаторы. У них есть ряд параметров: линейность, погрешность, воспроизводимость, разрешающая способность, гистерезис, напряжение срабатывания, шум, несущая способность, размах перемещения, чувствительность, вид переходной характеристики, потребляемая энергия [4] и износостойкость [4].

Для емкостных ключей из-за отсутствия физического контакта срок службы ограничен накопленным зарядом в диэлектрике, так как происходит снижение критического напряжения, в результате которого обкладки конденсатора схлопываются. Причиной уменьшения количества циклов переключений может являться шероховатость контактных поверхностей и «усталостные» явления упругого чувствительного элемента.

Актюаторы делятся на 5 групп:

- электростатические;
- магнитные;
- пьезоэлектрические;
- гидравлические;
- тепловые.

Самое широкое применение имеют электростатические актюаторы. У них малое время изменения состояния (приблизительно 10-100 мкс) и близкое к нулевому энергопотреблению при удержании их в выбранном положении (вследствие наличия механического гистерезиса). К недостаткам относятся высокое напряжение (порядка 40-60 В), которое необходимо для управления перемещением якоря (кантилевера), а также малая износостойкость и склонность к залипанию в крайних положениях.

Недостаток высокого напряжения электростатических актюаторов компенсируется их положительными свойствами, особенно в сравнении с диодами

и полевыми транзисторами, аналогичными им по выполнению функций переключения.

Снизить управляющее напряжение до 10-15 В, можно путем применения многоступенчатых электростатических актюаторов или встраиваемых микроэлектронных преобразователей напряжения [4].

Недостатком магнитных актюаторов является то, что они трудоемки в изготовлении и потребляют большой электрический ток, что ведет к большой потребляемой мощности. Для них мембранный элемент или кантилевер выполняется из ферромагнитного материала.

Высокое энергопотребление и выделение большого количества тепла, требующего рассеивания, являются недостатками тепловых актюаторов.

В пьезоэлектрических актюаторах коммутация обеспечивается за счет прилагаемого к отдельным элементам объемной структуры актюатора напряжения, приводящего к изменению физических размеров [4] пьезоэлемента.

Основные характеристики актюаторов с разными принципами работ приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 Характеристики актюаторов для режима чувствительности МЭМС.

Тип актюатора	Напряжение, В	Ток, мА	Мощность, мВт	Размер	Время переключения, мкс	Контактная сила, мкН
Электростатический	20-80	0	0	Малый	1-200	50-1000
Термический	3-5	5-100	0-200	Большой	300-10000	500-4000
Магнитостатический	3-5	20-150	0-100	Средний	300-1000	50-200
Пьезоэлектрический	3-20	0	0	Средний	50-500	50-200

Есть отдельный вид актюаторных устройств МЭМС на базе биметаллической технологии, использующей сплавы с памятью формы. В них коммутация осуществляется за счет свойств ряда материалов, которые были деформированы при низкой температуре, восстанавливать впоследствии при нагревании изначальную форму [4].

1.3 Датчики на основе МЭМС и их измерительные свойства

Для микромеханических датчиков, как и для всех измерительных устройств, характерно преобразование измерительного сигнала в выходной. Так, измеряемой величиной, на базе которой формируется выходной сигнал для ММА, является ускорение, для ММДД - давление, для ММГ - угловая скорость.

Процесс измерения проводится на фоне возмущений. Последние, в свою очередь, сами могут являться объектом измерений.

Необходимо учитывать тот факт, что в ходе измерения в датчиках появляются собственные колебания, которые ведут к искажению сигнала. Существуют статические и динамические измерения. При статическом режиме измерения скорость изменения измеряемой величины более чем на порядок меньше скорости собственных движений датчика. Если же эти скорости сопоставимы, то режим называется динамическим. В микродатчиках чаще присутствует статический режим измерения.

Микродатчик с точки зрения теории измерений может представляться измерительной цепью, которая содержит чувствительный элемент, первичные и вторичные преобразователи, а также электронные компоненты, предназначенные для операций преобразования измерительного сигнала, например, таких как функции измерения, сравнения, детектирования сигнала, а также модуляции и фильтрации. При наличии в датчиках электростатических и упругих сил подвеса [5] появляются нелинейные функции преобразования, которые необходимо устранять конструктивными мерами или электронными средствами.

Измерительная схема (цепь) представляется в виде последовательности звеньев. В них осуществляется то или иное преобразование, которое отображается в виде передаточной функции звена [5].

В измерительной цепи существует 3 способа соединения звеньев:

1. Последовательное;
2. Параллельно-согласное;
3. Параллельно-встречное.

Датчик измерения может одновременно принимать несколько параметров, тогда измерительная схема будет иметь два и более входа, соответственно.

Микродатчик будет воспроизводить измеряемые величины с некоторыми допустимыми погрешностями, которые характеризуют его измерительные свойства. К таким характеристикам относятся:

- Статическая характеристика, которая отображает функциональную связь между входной и выходной величинами. При линейной функциональной связи коэффициент прямой пропорциональности между этими величинами называют коэффициентом передачи (масштабным коэффициентом);

- Чувствительность, характеризующая отношение приращения выходного сигнала к приращению входного сигнала при условии стремления входного сигнала к нулю. Иначе говоря, она представляет собой производную от статической характеристики по входному сигналу. Чувствительность также можно определить по передаточной функции и через частотные характеристики;

- Переходный процесс, определяет полосу пропускания частот, а также частотные искажения измеряемого сигнала. Он может быть описан через дифференциальные уравнения цепи или звена, а также через передаточную функцию, фазо-частотную характеристику (ФЧХ) или импульсную передаточную функцию [5].

Микромеханические датчики можно подразделить на:

- ММА прямого преобразования (осевые ММА и маятниковые ММА);
- ММА компенсационного преобразования (ММА с электростатической обратной связью, ММА с магнитоэлектрической обратной связью);
- Микродатчик давления прямого преобразования;
- ММДД компенсационного преобразования (ММДД с электростатической обратной связью и ММДД с магнитоэлектрической обратной связью) [5];
- ММГ прямого преобразования (ММГ LR- и LL- типов; ММГ RR-типа).

1.4 МЭМС и их технологии в России

Перспективность разработок в области МЭМС объясняется растущей потребностью в них и широтой их использования в различных областях современной жизни, а также сочетанием высокой надежности и приемлемой себестоимостью, возможностью использования их в миниатюрных устройствах в самых различных объектах: от механических часов до имплантов для человека.

В настоящее время рынок МЭМС является очень быстрорастущим, а сами устройства МЭМС крайне востребованными. Ещё в 2009 году в России была официально зарегистрирована «Русская Ассоциация МЭМС», что позволило объединить работу крупнейших компаний и предприятий России, связанных с изделиями на основе устройств МЭМС, с мировыми ведущими корпорациями, успешно развивающими данную область.

Всё это должно вести к росту объемов разработки и производства МЭМС в России, а также способствовать появлению новых изделий, предназначенных для широкого круга конечных потребителей [5].

В задачи «Русской Ассоциации МЭМС» входит организация специальных учебных программ по вопросам МЭМС с широким привлечением зарубежных специалистов, организация стажировок на ведущих европейских предприятиях, а также содействие в реализации совместных проектов российских и зарубежных фирм.

В «Русской Ассоциации МЭМС» осуществляется разработка проектов по созданию технологии микромагнитомеханических актюаторов на базе наноструктурированных пленок в автомобильной и авиационной промышленности.

В план дальнейшей работы включены следующие задачи: внедрение МЭМС актюаторов на основе наноструктурированных пленок интерметаллидов с огромной величиной магнитострикции и памятью формы, а также создание магнитоуправляемых пульсирующих газовых микроинжекторов и микромагнитомеханических элементов для систем контроля давления и расхода газоздушных смесей.

Особое место отводится созданию микромагнитомеханических актюаторов для газовых микроклапанов и микроинжекторов при управлении воздушными потоками вблизи слоев, прилегающих к крыльям и турбинам металлических актюаторов.

Всё это говорит о возможности создания в нашей стране современных, рентабельных, конкурентоспособных и надёжных МЭМС.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что представляет собой МЭМС?
2. Преимущественные области применения МЭМС.
3. Отличие сенсорных устройств МЭМС от актюаторных.
4. Обязательно ли в МЭМС наличие подвижных элементов?
5. Каковы основные характеристики актюаторов?
6. Как подразделяются микромеханические датчики?
7. Что такое МЭМС актюаторы?
8. Что требуется для успешной разработки МЭМС?
9. Какова цель актюаторного механизма?
10. Что относится к радиочастотным МЭМС- актюаторам?
11. На сколько групп делятся актюаторы?
12. Какие группы актюаторов существуют?
13. Для чего предназначены датчики на основе МЭМС?
14. По каким классам международного патентного классификатора имеются патенты в России на МЭМС?
15. Назовите примеры РЧ МЭМС.
16. Перечислите характеристики актюаторов с различными принципами работы.
17. Каков принцип действия перестраиваемого МЭМС-конденсатора с гребенчатой структурой?
18. Область использования МЭМС-варакторов.
19. Назовите условие получения высоких значений добротности и резонансной частоты.
20. Отличие резонатора вертикального смещения от резонатора бокового смещения?
21. На базе каких элементов проектируются перестраиваемые частотные фильтры?
22. Назовите три основные группы МЭМС-генераторов.
23. Из каких элементов состоит МЭМС-устройство?
24. Перечислите преимущества датчиков МЭМС.
25. Где используются МЭМС-устройства?
26. Какие свойства кремния используются при создании на его основе МЭМС-устройств?
27. Что такое кантилевер в МЭМС-устройствах? Где он используется?
28. Опишите основные характеристики МЭМС сенсоров.
29. Какими факторами определяется погрешность измерений МЭМС-сенсоров?
30. Какого рода погрешность можно устранить с помощью калибровки МЭМС-сенсора?

31. Опишите основные конструктивные варианты элементов микромеханических сенсоров. Дайте характеристику их свойств.
32. Какие физические механизмы определяют проявление пьезоэффекта?
33. Каков принцип действия и область применения емкостных МЭМС-сенсоров?
34. Что относится к микромеханическим приборам?
35. Опишите область применения и конструктивные особенности тензорезисторов.
36. Опишите принцип действия датчика давлений. Для чего применяется мостовая измерительная схема?
37. Опишите принцип работы микромеханических гироскопов.
38. Опишите назначение и общую классификацию актюаторов.
39. Опишите основные конструктивные варианты пьезоэлектрических актюаторов. Дайте характеристику их свойств.
40. Какие физические механизмы определяют проявление обратного пьезоэффекта?
41. Опишите принцип работы биморфных пьезоэлектрических актюаторов.
42. Опишите основные конструктивные варианты емкостных актюаторов. Дайте характеристику их свойств.
43. Опишите основные конструктивные варианты термомеханических актюаторов. Дайте характеристику их свойств.
44. Опишите основные конструктивные варианты электромагнитных актюаторов. Дайте характеристику их свойств.
45. Опишите принцип работы электромагнитных актюаторов.
46. Какие физические механизмы определяют проявление эффекта «памяти формы»?
47. Какие механизмы активации используются для создания устройств микросмещения и микропозиционирования? Каковы конструктивные особенности этих устройств?
48. Опишите область применения и конструктивные особенности генераторов-вибраторов.
49. Перечислите варианты конструкций планарных и объемных микроиндукторов.
50. Как зависит добротность катушки индуктивности от занимаемой ею площади?
51. Назовите основные типы регулируемых конденсаторов.
52. Опишите конструкцию и принцип действия микроантенны.
53. Опишите конструкции и принцип действия микрореле и коммутаторов.

54. Какие характеристики оценивают измерительные свойства микродатчиков?
55. Какие виды микрогироскопов прямого преобразования существуют?
56. Как осуществляется проектирование чувствительного элемента микроакселерометра со складчатым подвесом?
57. Как осуществляется проектирование чувствительного элемента микроакселерометра с подвесом «ноги краба»?
58. Как осуществляется проектирование чувствительного элемента микроакселерометра с загнутым подвесом?

2. Анализ конструкций и принципов работы микромеханических датчиков

2.1 Микромеханические акселерометры

ММА становятся все более перспективными приборами современной отечественной и зарубежной МСТ. К их преимуществам относятся малые массогабариты, низкое электропотребление, а также способность выполнять свои функции в неблагоприятных условиях эксплуатации. Сфера использования ММА очень широка. Они используются во многих миниатюрных системах ориентации и навигации для воздушных, наводных и подводных судов различного назначения, а также в системах управления транспортными средствами, в космической и военной техники и т.д.

ММА включают в свой состав инерционную массу (ИМ) и упругие ЧЭ. Выходной сигнал ММА и сам принцип измерения данного вида микродатчика обуславливается преобразованием параметров перемещения, деформаций, сил в электрический сигнал. ИМ и подвес представляют собой конструктивный узел, который связан с ЧЭ этого прибора.

ММА по виду движения классифицируют на осевые и маятниковые, что определяется конструкцией их упругих подвесов. Для осевых ММА конструкция обеспечивает прямолинейный характер движения, а для маятниковых – угловой. Поэтому ММА маятникового вида также называют угловыми или балочными. Инерционная масса ММА может перемещаться вдоль одной или нескольких осей. Для этого в корпусе ММА установлены ЧЭ с различным направлением оси чувствительности.

Благодаря тому, что ЧЭ ММА испытывают действие силы тяжести, они могут использоваться для измерения углов наклона объектов мониторинга. Такие акселерометры, предназначенные специально для измерения углов наклона, называются наклономерами.

У ММА, помимо оси чувствительности, существуют перпендикулярные к ней поперечные оси. Если ММА имеет одну ось чувствительности, то он относится к однокомпонентным датчикам. Однако в одном корпусе датчика могут присутствовать компоненты с различными направлениями оси чувствительностью, тогда они будут называться двух- и трехкомпонентными ММА.

Другая классификация ММА производится с учетом возможности измерения линейного или углового ускорения. Так, ММА подразделяются на линейные и угловые, в зависимости от вида измеряемого ускорения.

Если ось чувствительности параллельна вектору измеряемого ускорения, то это линейный акселерометр. В угловых акселерометрах ось чувствительности параллельна вектору линейного ускорения, который является следствием углового ускорения.

ММА можно разделять по принципу измерения на датчики прямого и компенсационного преобразования. ЧЭ датчиков прямого преобразования передают информацию о воздействующем на них ускорении в виде перемещения ИМ, а также деформации упругих элементов (УЭ) подвеса. При этом все виды погрешностей измерительной цепи будут присутствовать в выходном сигнале акселерометра. Тогда как в компенсационных ММА сила, порождаемая измеряемым ускорением и оказывающая непосредственное воздействие на ИМ, будет частично или полностью уравновешиваться за счёт цепи отрицательной обратной связи. Наличие интегратора в контуре обеспечивает компенсацию (разгрузку) УЭ ММА посредством выходного сигнала, который поступает на устройство компенсации УЭ. При этом погрешность цепи зависит в основном от свойств преобразователя.

К основным характеристикам ММА относятся:

- чувствительность,
- диапазон измерений;
- полоса пропускания частот;
- масштабный коэффициент;
- точность;
- быстродействие.

Существует ряд других дополнительных характеристик, таких как плотность шумов, поперечная ошибка, резонансные частоты, напряжение питания, потребляемый ток и тому подобное.

Точность измерения ММА зависит от величины смещения нуля, чувствительности (погрешность полной шкалы), а также от дрейфа (температурного и временного) этих параметров. На точность также влияет поперечная чувствительность и погрешности линейности (нелинейность). В идеале поперечная чувствительность должна равняться нулю.

Шум, содержащийся в выходном сигнале, влияет на разрешающую способность датчика. Его влияние негативно сказывается при измерении ускорений малой величины. Предельное разрешение ММА зависит от внешнего фонового шума и собственного шума датчика. Для уменьшения шумов рекомендуется использование фильтров низких частот на выходе датчика. Фильтры улучшают отношение сигнал/шум и повышают разрешающую способность, но могут вносить амплитудные и фазовые искажения частоты.

При использовании ММА необходимо учитывать, что перемещение ИМ определяется результирующим вектором от действующих на датчик внешних сил и сил инерции.

2.2 Микромеханические гироскопы

С расширением традиционных сфер использования ММГ и появлением новых областей их применения возникла потребность в недорогих и миниатюрных датчиках угловой скорости. Традиционно гироскопы находили применение в антеннах и оптических системах, в устройствах искусственного горизонта и судовых успокоителях качки. В настоящее время с развитием микроэлектронных технологий стал возможным выпуск миниатюрных вибрационных гироскопов, которые и назвали ММГ.

Однако на точность функционирования ММГ оказывает влияние целый ряд негативных факторов, которые могут возникать как в процессе создания, так и в ходе эксплуатации датчиков.

ММГ относятся к электромеханическим системам. В них энергия первичных колебаний ИМ на резонаторе (или упругом подвесе) при возникновении угловой скорости переходит в энергию вторичных колебаний, которые несут информацию об измеряемой угловой скорости. На упругий подвес действуют силы Кориолиса.

ММГ применяется для измерения угловых скоростей и включает в свой состав электронный чип с кварцевой подложкой. Его габаритные размеры $\sim 10^{-2}$ м. Он состоит из механического ЧЭ и электронных компонентов. К преимуществам ММГ относятся малые массо-габариты, высокая рентабельность, малое энергопотребление, хорошая устойчивость к механическим нагрузкам и отсутствие вращающихся элементов. Эти достоинства позволили применять ММГ в машиностроении, медицине, оптических устройствах (бинокли, телескопы, камеры), мобильных телефонах, робототехнике и т.д.

С точки зрения технологии изготовления наиболее распространены вибрационные методы для создания угловых или поступательных перемещений ИМ на гибких торсионах.

В качестве материалов в ММГ широко применяется кремний и кварц. Широко распространены два вида технологии обработки этих материалов:

- объемная (bulkmicromachined);

- поверхностная (surfacemicromachined).

Кремниевая технология получила широкое применение благодаря ряду свойств кремния в качестве конструкционного материала:

1. высокой жесткости, лучшей, чем у остальных сплавов почти в два раза;
2. низким внутренним потерям;
3. высокой рентабельности и доступности.

При объёмной микрообработке кремний травят химическими реагентами с учётом кристаллографических направлений. При поверхностной обработке кремниевые пластины играют роль подложки, на которой с помощью фотолитографии, анизотропного травления и процесса диффузии формируют требуемый рельеф. Далее проводят анодное сращивание и с подложки удаляют лишние слои кремниевого материала.

Очень важна возможность реализации механической части ММГ на одной плате с электронными компонентами, что позволяет получить единый интегральный модуль или чип. Этот модуль может содержать несколько датчиков (гироскопы, акселерометры и другие устройства) и иметь малую потребляемую мощность (~ 0.5-1 Вт).

Основными элементами ММГ являются ИМ, УЭ подвеса, элементы привода, элементы, отвечающие за съём сигнала, и анкер.

К дополнительным элементом ММГ можно отнести:

- компенсаторы измерения длины УЭ;
- кинематические связи для синхронизации движения ИМ или увеличения масштабного коэффициента [6].

ММГ характеризуются определённым набором классификационных признаков.

К ним относятся:

1. число измерительных осей;
2. число ИМ;
3. тип подвеса;
4. наличие кинематических связей;
5. вид перемещения ИМ;

6. тип привода;
7. тип датчика съема сигнала.

Согласно вышеизложенному, можно произвести классификацию ММГ по:

1. количеству измерительных осей (однокомпонентный, двухкомпонентный);
2. количеству инерционных масс (одномассовый, многомассовый);
3. типу подвеса (механический (наружный и внешний) и неконтактный);
4. наличию кинематических связей;
5. виду перемещения инерционных масс;
6. типу привода (обратные преобразователи);
7. типу датчика съема сигнала (прямые преобразователи).

ММГ осуществляют измерение угловых скоростей относительно одной или двух координатных осей.

ИМ – главный элемент микромеханического гироскопа, её поступательное движение приводит к появлению количества движения, а вращательное создает момент количества движения.

В ММГ механические подвесы играют роль упругих микроструктур разнообразной конфигурации (стержневые, петлевые, спиральные и др.).

Возможен любой вид неконтактного подвеса, реализованного на физическом принципе, обеспечивающем левитацию инерционной массы. Неконтактный подвес называется по физическому принципу его работы: электростатический, магнитный и др. [7].

Возможны два режима взаимного перемещения ИМ:

- 1) в режиме движения (РД);
- 2) в режиме чувствительности (РЧ).

В первом случае в обоих режимах движения ИМ перемещаются в одной плоскости. Во втором случае ИМ в РЧ выходят из плоскости их перемещения в РД.

По виду движения [8] инерционной массы в РД и РЧ различают три типа гироскопов:

1. LL – гироскопы (linea-linea)
2. RR – гироскопы (rotare-rotare)
3. LR – гироскопы (linea- rotare), в них присутствуют различные комбинации поступательного и вращательного движения ИМ.

В ММГ могут быть использованы актюаторы, обеспечивающие привод ИМ в режиме движения с заданными параметрами: магнитоэлектрические, электромагнитные, пьезоэлектрические. Наиболее широко используется электростатический привод, выполненный в виде гребенчатых структур.

В ММГ могут быть использованы датчики съема сигнала, они отвечают за выработку информации об измеряемых угловых скоростях.

2.3 Микромеханические датчики давления

Конструкция ММДД включает в свой состав ЧЭ, воспринимающие давление, и различные преобразователи (перемещения, деформации и силы). Эти элементы собраны в корпус, конструкция которого представлена широким ассортиментом.

В качестве ЧЭ ММДД выступает тонкая, например кремниевая пластинка (мембрана). Она может иметь прямоугольную или круглую форму. Толщина её может быть одинаковой или иметь сформированный жёсткий недеформируемый центр, который снабжен упругой перемычкой по контуру.

Основными техническими характеристиками ММДД являются:

- рабочий диапазон измерений,
- чувствительность к измеряемому давлению,
- выходное напряжение [5].

Точность измерения ММДД зависит от таких составляющих погрешности как нелинейность характеристики, гистерезиса и температурного дрейфа начального смещения, а также чувствительности.

По виду измеряемого давления ММДД делятся на 4 группы:

- абсолютные (измеряют абсолютное давление);
- дифференциальные (измеряют разность давлений);
- относительные (измеряют избыточное давление над атмосферным давлением);
- вакуумные (измеряют степень разрежения).

По принципу действия ММДД разделяются на датчики прямого и компенсационного преобразования. Датчики прямого измерения (или устройства разомкнутой конфигурации) имеют явно выраженную зависимость от свойств материала мембранного элемента, что требует индивидуальной калибровки и поэтому не очень рентабельны в производстве.

Датчики компенсационного типа является менее зависимыми от свойств материала, так, например, датчик силы (актюатор) невосприимчив к изменению свойств материала.

Если мембраны ММДД выполнены без жесткого центра, то в качестве преобразователей деформации применяются диффузные и эпитаксиальные тензорезисторы. При наличии жёсткого центра у мембраны их применяют в емкостных, магниторезистивных и других датчиках перемещений. Для ММДД компенсационного типа применяются мембраны с жёстким центром. На нём размещены элементы преобразователя перемещений, а также силовые элементы цепи обратной связи. Они могут быть электростатического или магнитного типа.

Для преобразователей перемещений и деформаций мембранных элементов часто используют полупроводниковые преобразователи (ПП). Однако они обладают недостатками, которые существенно зависят от технологии их изготовления. Так, в ПП мембранных элементах, исполненных по технологии объемного кремния, из-за наличия р-п переходов ограничен температурный диапазон использования ММДД (температурой менее 100 °С). Если ПП мембранный элемент выполнен из поликремния с низкой тензочувствительностью, то тензорезисторы с изоляцией диоксидом кремния будут обладать малой амплитудой выходного сигнала. Для ПП мембранных элементов на основе структур «кремний на сапфире» (КНС) характерны недостатки, связанные с несовпадением кристаллических решеток, а также повышенной стоимостью и сложностью обработки сапфирового материала.

Наиболее перспективным является использование ММДД с ПП мембранным элементом, полученным методом формирования структур «кремний на диэлектрике». Эти датчики могут работать при температуре более 100°С. Они характеризуются повышенной стабильностью характеристик и устойчивостью к внешним физическим воздействиям. [9]

2.3.1 Конструкции микромеханических датчиков давления фирмы Motorola

Фирма Motorola выпускает кремниевые датчики давления в двух модификациях: дифференциальная и абсолютная. Они имеют одинаковые базовые корпуса (рисунок 2.1).

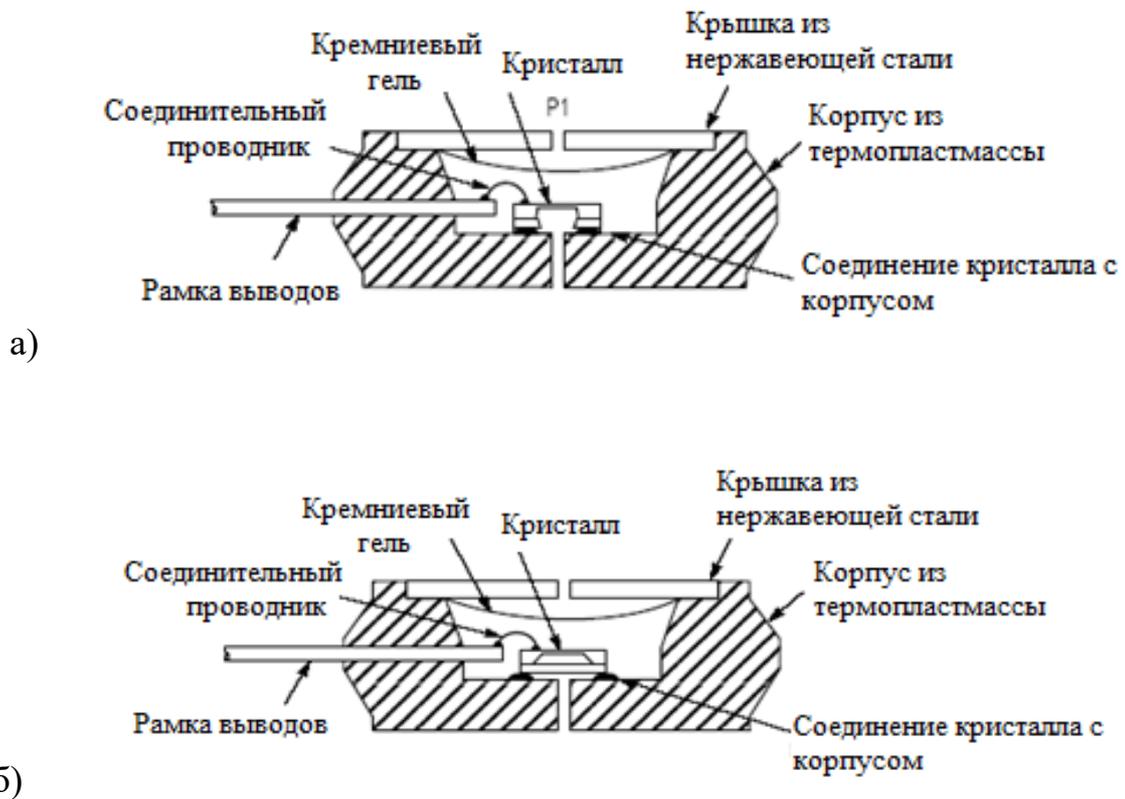


Рисунок 2.1 - Поперечное сечение базовых корпусов: а) датчик дифференциального давления; б) датчик абсолютного давления.

На рисунке 2.2 представлен базовый корпус датчика дифференциального давления.

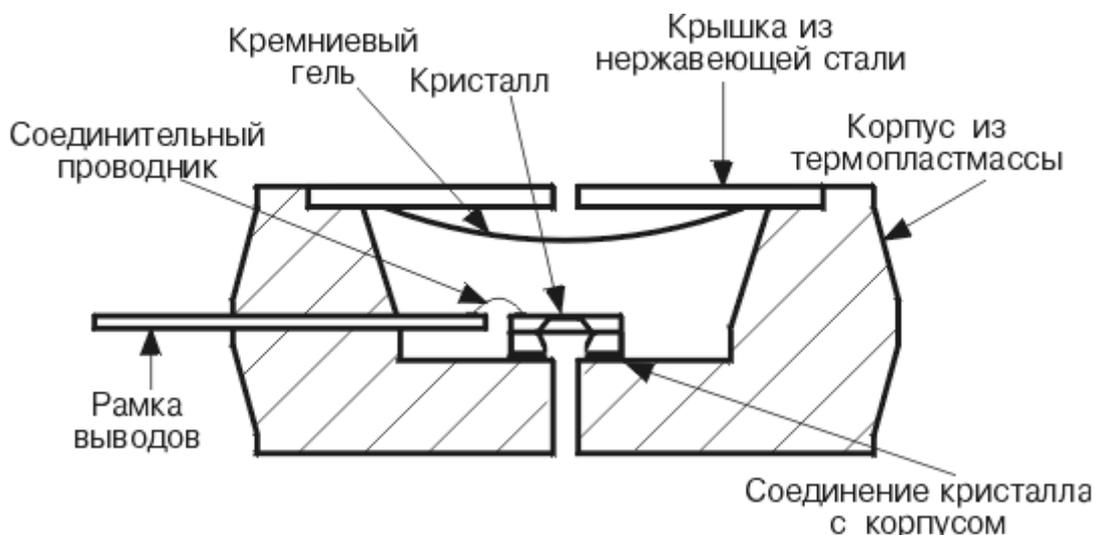


Рисунок 2.2 - Поперечное сечение базового корпуса дифференциального датчика давления

Датчик давления содержит кристалл. На нём закреплена кремниевая диафрагма с ЧЭ (имплантированной тензорезистивной цепочкой x-duser). Отличие между кристаллами двух модификаций датчика давления состоит в том, что у датчика абсолютного давления нет отверстия в нижней части, которая представляет собой кремниевую изолирующую пластину и полость. Эта полость образована углублением, которое протравлено в верхней пластине. Полость содержит вакуум (опорное давление) (рисунок 2.3).

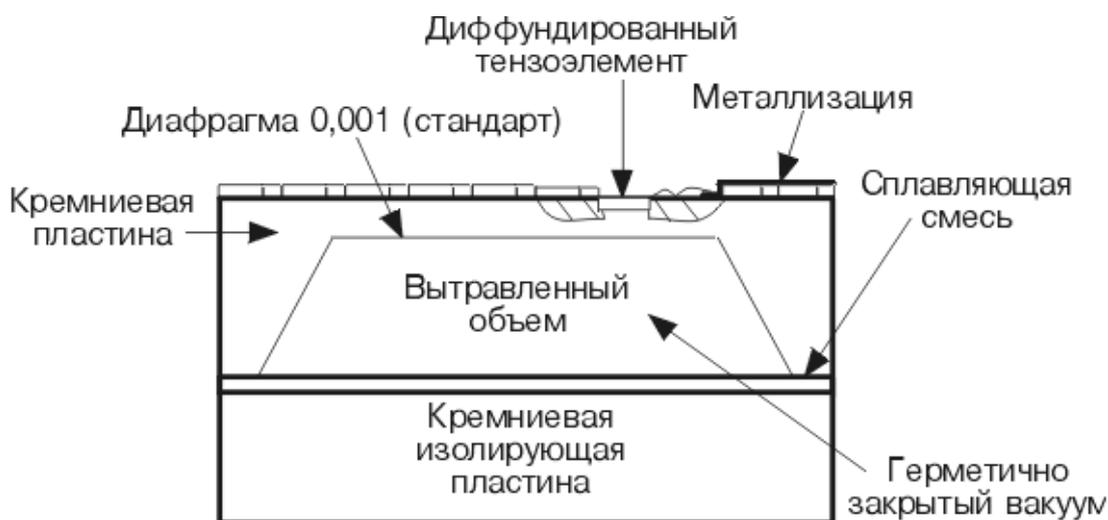


Рисунок 2.3 - Кристалл датчика абсолютного давления

Для изоляции поверхности кристалла и соединительных проводников от повреждений твердыми частицами используется кремниевый гель. Эти частицы попадают в среду, которая передаёт давление на мембрану. На кремниевом кристаллодержателе, прикрепленном к корпусу датчика, расположен кристалл датчика давления. Компаунд заполняет внутреннюю полость. Сам пластмассовый корпус закрыт крышкой, материал, которой выполнен из нержавеющей стали. Внешние выводы, соединённые с помощью золотых проволочек, связаны с рамкой выводов кристалла, впрессованных в корпус датчика давления.

Функционирование ЧЭ тензодатчика давления основано на тензорезистивном эффекте. Тензорезистивный эффект базируется на изменении межатомных расстояний в условиях деформации. Это приводит к изменению структуры энергетических зон в кристаллах. Изменения в энергетических зонах ведут к изменению концентрации носителей зарядов (электронов и дырок), а также их эффективной массы. Это ведет к перераспределению носителей тока между энергетическими максимумами в зоне проводимости и минимумами валентной зоны в полупроводниках (например, в Ge и Si). Деформация оказывает также влияние на механизм процесса рассеяния носителей. В целом тензорезистивный эффект используется в тензодатчиках сопротивления, позволяющих осуществлять измерение деформации.

Большинство фирм, производящих датчики давления, создают первичный преобразователь "давление - напряжение" по схеме моста Уинстона, которая обладает рядом недостатков:

- Схема включает в свой состав 4 подбираемых резистора;
- Требуется их настройка;
- Требуется сложные схемы для температурной компенсации погрешности.

Для устранения этих недостатков фирма Motorola нашла альтернативное решение (запатентованное ими), которое носит торговую марку X-duser. Название X-duser обусловлено X-образной формой преобразователя смотри рисунок 2.4.

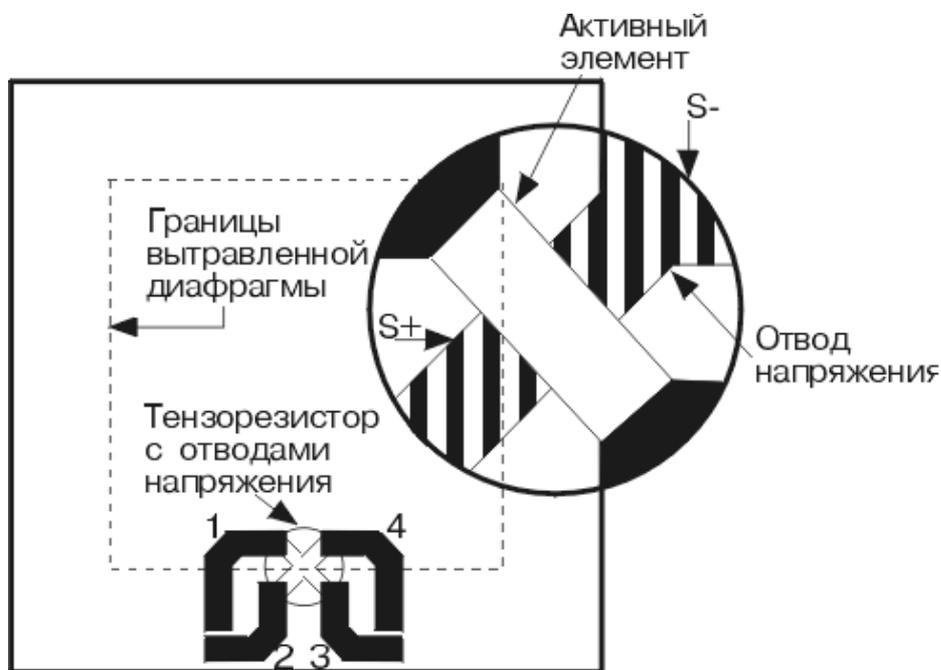


Рисунок 2.4 - Чувствительный элемент x – duster. Выводы: 1. GROUND (Земля); 2. $+V_{out}$; 3. V_s ; 4. $-V_{out}$.

Этот элемент представляет собой кремниевую мембрану, на которую методом ионной имплантации внедрена тензорезистивная структура x -образной формы. При использовании этого элемента на выходе получается напряжение, которое прямо пропорционально создаваемому давлению. При этом получаются очень высокие показатели линейности, воспроизводимости, чувствительности и отношения сигнал-шум. Одна пара выводов предназначена для подачи напряжения питания, а со второй снимается разность потенциалов.

Для реализации этого датчика давления использована технология МЭМС, позволяющая получить точный аналоговый выходной сигнал прямо пропорциональный приложенному давлению.

2.3.2 Принцип работы датчиков давления

При протекании тока по резистору (выводы 1 и 3 рисунок 2.4) подаваемое к мембране давление вызывает изгиб резистора. Это приводит к появлению в резисторе поперечного электрического поля, что сопровождается появлением на выводах 2 и 4 напряжения. Выводы 2 и 4 соединены со средней точкой резистора (Рисунок 2.4). При этом выходной сигнал меняется прямо пропорционально приложенному давлению. Температурный коэффициент совпадает с температурным коэффициентом диафрагмы. Однако выходные параметры самого тензодатчика имеют зависимость от температуры и требуют температурной компенсации. При температуре от 0 до 85 °С достаточно простой резистивной цепочки, а при температуре от -40 до 125 °С необходима дополнительная компенсация, которая требует реализации внешней схемы.

Таким образом, использование одного чувствительного элемента х-образной формы исключает потребность в четырех резисторах, входящих в состав моста Уинстона. Также существенно упрощаются дополнительные схемы, которые необходимы для калибровки и температурной компенсации. Установлено, что начальное смещение в основном определяется степенью выравнивания проводов, которые снимают напряжения (речь идет об отводящих проводах). Выравнивание осуществляется в едином литографическом процессе, тогда как использование положительного напряжения ведет к упрощению схемы сведения нежелательного смещения к нулю.

2.3.3 Основные характеристики датчиков давления

К основным характеристикам датчика давления можно отнести:

1. Размах выходного напряжения (full-scale span Terra v_{fss}), который равен алгебраической разнице между выходным напряжением при наибольшем сертифицированном рабочем давлении и напряжением при наименьшем его значении.

2. Начальное смещение (V_{off}) — это напряжение при воздействии на датчик давления наименьшего сертифицированного давления.

3. Точность, характеризующая суммарную ошибку, состоит из:

— нелинейности (отклонение $U_{вых}$ от линейного соотношения P/V_{out});

— гистерезиса температуры (отличия $U_{вых}$ при изменении температуры в пределах от минимального до максимального значения или при нулевом дифференциальном давлении);

— гистерезиса давления (отличие $U_{вых}$ при изменении сертифицированного давления от минимального к максимальному (и наоборот) при температуре 25°C);

— стабильности смещения (разница $U_{вых}$ после 1000 циклов изменения температуры от - 40 до 125°C и при числе минимальных сертифицированных циклов давления равных 1,5 мил.);

— температурной ошибки (разница $U_{вых}$ при изменении температуры от 0 до 85°C относительно нормы - 25°C);

— ошибки смещения (разница $U_{вых}$ при приложении минимального сертифицированного давления при изменении температуры от 0 до 85 °C относительно 25 °C);

— отклонения от номинала (отклонение от номинала смещения или размаха $U_{вых}$ в процентах от V_{fss} при 25 °C);

4. Время отклика (время нарастания $U_{вых}$ от 10% до 90% его конечного значения, которое определяется изменением давления).

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Сфера использования ММА.
2. Для чего служит ИМ в ММА?
3. Роль чувствительных элементов в ММП.
4. За счёт чего можно улучшить соотношение сигнал/шум в ММА?
5. Области применения МГГ.
6. Что такое РД и РЧ в МГГ?
7. Какие три типа ММГ существуют по виду движения.
8. Основные элементы ММГ.
9. Классификационные признаки ММГ.
10. Области применения ММДД.
11. Основные технические характеристики ММДД.
12. Что такое датчики ММДД прямого и компенсационного преобразования?
13. Какие виды мембран используются в ММДД?
14. Анализ принципиальных схем ЧЭ осевых ММА.
15. Анализ принципиальных схем ЧЭ маятниковых ММА.
16. Уравнение движения и анализ сил осевого и маятникового ММА.
17. Как осуществляется формирование информации об измеряемом ускорении?
18. Анализ принципиальных схем ММДД.
19. Как формируется информация об измеряемом давлении?
20. Схемотехнические особенности ММГ.
21. Момент сил Кориолиса.
22. Прецессия гироскопа.
23. Каковы измерительные свойства МГГ LL-, LR-, RR- типов?
24. Как осуществляется проектирование чувствительного элемента ММА с подвесом из фиксированных с обоих концов балок?
25. Как осуществляется проектирование тензорезистивного датчика давления?
26. Синтез топологии ММДД.
27. Синтез топологии одномассового ММГ.
28. Синтез топологии двухмассового ММГ.
29. Как осуществляется проектирование емкостного интерфейса ММА?
30. Как осуществляется проектирование емкостного интерфейса ММГ?
31. Что такое МСТ в России?
32. Преимущества МСТ.

33. Важнейшие составные компоненты ММА.
34. Классификация микроконтроллеров метров по виду движения.
35. Классификация ММА с учетом возможности измерения линейного и углового ускорения.
36. Классификация ММА по виду преобразования.
37. Какое преобразование энергии происходит в ММГ?
38. Из чего состоит ММГ?
39. Преимущества ММГ.
40. Материалы для ММГ.
41. Преимущества кремния как конструкционного материала для ММГ.
42. Как классифицируются ММГ по количеству измерительных осей?
43. Как классифицируются ММГ по количеству ИМ?
44. Назначение ИМ ММГ.
45. Сколько режимов взаимного перемещения ИМ может быть?
46. Что включает в себя конструкция ММДД?
47. Основные технические характеристики ММДД.
48. На сколько групп по виду измеряемого давления делятся ММДД?
49. Классификация ММДД по принципу действия.
50. Если мембрана ММДД выполнена без жёсткого центра, то что используется в качестве преобразователей деформации?
51. Для чего используется мембрана с жёстким центром в ММДД?
52. Каковы недостатки полупроводниковых преобразователей с мембранным элементом на основе структур "кремний на сапфире"?

3. Технология изготовления микроструктур и устройств МЭМС

Технологии изготовления устройств МЭМС базируются на технологии этапов изготовления интегральных схем (ИС), которые адаптированы для формирования трехмерных структур.

В настоящее время выделяется три основных метода микрообработки изготовления МЭМС устройства: объёмная, поверхностная и высокопрофильная микрообработка [5].

3.1 Объёмная микрообработка

Объёмная микрообработка состоит в процессе удаления материала подложки в целях формирования требуемой структуры, которая включает в свой состав гибкие консоли или кантилеверы, отверстия, канавки и мембранные элементы. Чтобы сформировать закруглённые углубления, необходимо удалять материал с помощью изотропного травления. Для получения v-образных канавок, пирамид и выемок подходит анизотропное травление, а для создания прямоугольных карманов применимо глубокое ионное травление. Есть вариант формирования трехмерной структуры за счет объединения нескольких подложек методом наращивания (с образованием вертикальных связей на атомарном уровне).

Основные особенности объёмной микрообработки даны в таблице 3.1 [11].

Таблица 3.1 Особенности процесса объёмной микрообработки

Параметры процесса	Преимущества	Недостатки
1. Параметры плазмы: — состав газа — напряжение смещения — температура подложки — плотность плазмы — давление процесса	Осмысленно получаемое горизонтальное изображение	Обработка пластин по отдельности

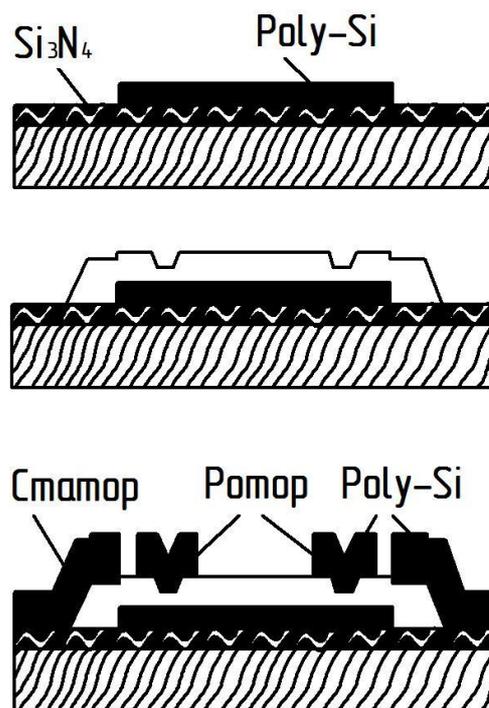
<p>2. Маскирование полимерами и тонкими пленками:</p> <ul style="list-style-type: none"> — термическое SiO₂; — химическое осаждение из паровой фазы при пониженном давлении SiO₂ или Si₃N₄; — нанесение фоторезиста; — металлизация (Cr, Al) 	<p>Изменяемый профиль</p>	<p>Увеличение времени травления</p>
<p>3. Химическое воздействие:</p> <ul style="list-style-type: none"> — с обратной стороны (мембраны, отверстия) геометрическая форма определяется шаблоном маски; — с передней стороны (консоли, каналы, затворы) геометрическая форма определяется подтравливанием 	<p>Возможно получение рельефных изображений</p>	<p>Нет собственного ограничителя травления и определения изображения</p>
<p>4. Газы травителя:</p> <p>SF₆, CBrF₃ при T<270 К</p> <p>SF₆, O₂ при T<100 К</p> <p>CHF₃, O₂ при T< 100 К</p> <p>CHCl₃ при T< 270 К</p>	<p>-</p>	<p>-</p>

3.2 Поверхностная микрообработка

Поверхностная микрообработка состоит в последовательном осаждении на подложку структурных кремниевых слоёв и «жертвенных» слоев, которые выполнены из диоксида кремния, нитрида кремния или полимера. Методом фотолитографии в этих структурных слоях формируют рисунок поперечного сечения создаваемого узла. Далее, используя жидкость или сухое травление, удаляют «жертвенный» слой, что приводит к образованию зазоров и пустот между механическими элементами узла. Геометрические параметры такого узла: толщина - 10-50 мкм, высота - 10-30 мкм. Выступающие элементы, например, зубцы передающего механизма, консоли, мембраны, формируются подобным образом.

Эта технология хорошо совместима с полупроводниковой [4] технологией на базе комплементарной структуры металл-оксид-полупроводник (КМОП-технологий). Её достоинство заключается в возможности многократного удаления вспомогательных слоев без повреждения взаимосвязи базовых структурных слоев.

Этапы поверхностной микрообработки при формировании МЭМС- устройств приведены на рисунке 3.1, а основные особенности процесса поверхностной обработки даны в таблице 3.2 [12].



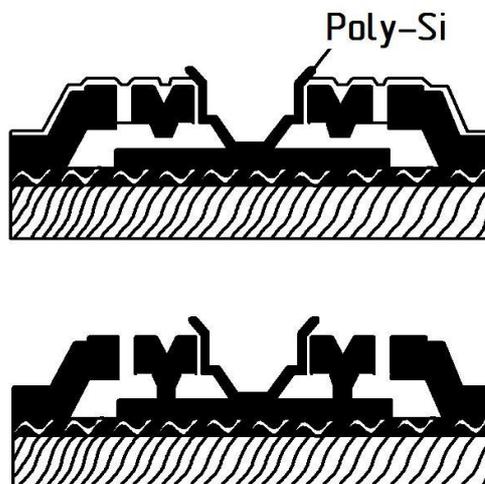


Рисунок 3.1 – Поверхностная обработка

Таблица 3.2 - Особенности процесса поверхностной микрообработки

Параметры процесса	Преимущества	Недостатки
1. Плазмохимическое осаждение из паровой фазы или химическое осаждение из паровой фазы при пониженном давлении поликристаллического кремния, фосфорокварцевого стекла	Осмысленно получаемая горизонтальная геометрическая форма	Уменьшенное отношение ширины канала к длине
2. Маскирование полимерами и тонкими пленками: - нанесение фоторезиста; - термически SiO ₂ ; - химическим осаждением из паровой фазы при пониженном давлении SiO ₂ или Si ₃ N ₄ фосфорокварцевого стекла	Изменяемый профиль	Сокращение количества материалов
3. Сухое и жидкое термическое окисление	Есть возможность получать свободные структуры	-

4. Геометрическая форма определяется маскированием и при травлении	Совместимость с КМОП	-
5. Травление (сухое и жидкое)	-	-

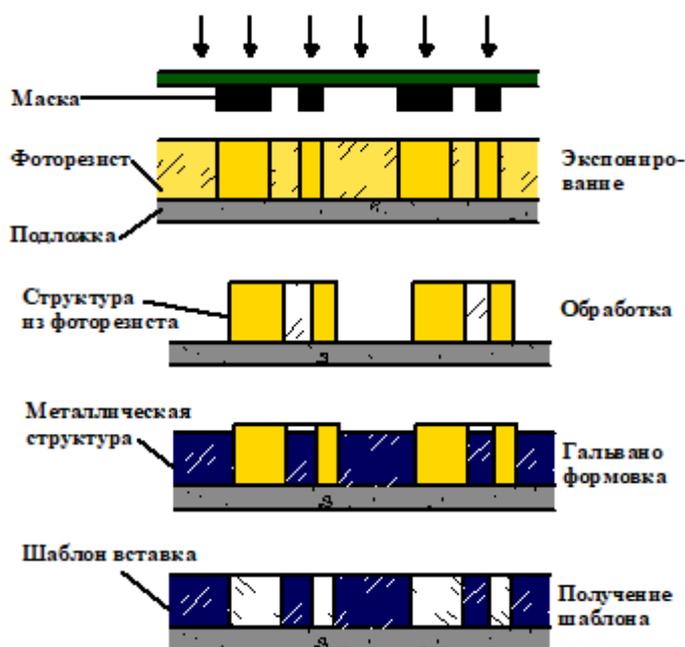
3.3 Высокопрофильная микрообработка

Целью высокопрофильной микрообработки (Lithography-Galvanik-Abformung – LIGA) является получение высокого отношения высоты профиля к его ширине в трехмерной структуре. Здесь применимы такие методы, как фото и рентгенография, электроосаждение и формование.

С помощью рентгеновского излучения в толстом полимерном слое фоторезисторов формируются канавки (до $5 \cdot 10^{-3}$ м), имеющие отвесные стенки. Далее, используя метод гальванического осаждения, формируют высокопрофильные трехмерные структуры. Поэтому технология LIGA позволяет обеспечить наилучшее соотношение высоты профиля к его ширине, а также ширины канала к его длине, при условии обеспечения минимальных размеров элементов.

Всего требуется от 5 до 25 операций рентгеновской литографии в зависимости от сложности МЭМС [4] устройства.

На рисунке 3.2 приведён процесс создания МЭМС структуры по технологии LIGA, а в таблице 3.3 [11] даны основные особенности применения технологии LIGA.



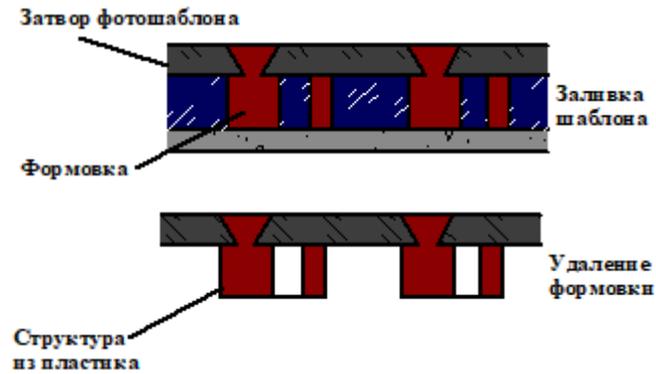


Рисунок 3.2 - Процесс создания МЭМС-устройств по LIGA-технологии.

Таблица 3.3 - Особенности применения LIGA-технологии.

Параметры процесса	Преимущества	Недостатки
1. Рентгенолитография (синхротрон) в полиметилметакрилате	Имеет наилучшее отношение ширины канала к длине при минимальных размерах	Ограничена возможности комбинирования с полупроводниковой технологией (КМОП)
2. Гальваника	Структуры с высоким разрешением топографического изображения	Есть ограничения на форму рельефа и на получение свободно перемещаемых структур
3. Дочерняя и большая дочерняя копия из полиметров или металла	Жесткий допуск	Ограничена точность по высоте

У технологии LIGA есть ещё ряд преимуществ:

- можно формировать свободно перемещаемые структуры;
- возможность использования разнообразных материалов.

К недостаткам технологии LIGA относятся:

- повышенная сложность изготовления;
- высокая стоимость маски и экспонирования.

3.4 Другие виды микрообработки

Помимо LIGA технологии, применяются и другие технологии обработки:

1. SIGA-технология (ультрафиолетовая литография, гальваника и формовка). Она позволяет управлять шириной профиля структуры МЭМС и хорошо совместима с технологией тонких пленок. Этапы этой технологии: ультрафиолетовая литография, осаждение слоёв, плазменное травление, гальваника и получение копий из полимеров или металлов.

2. HART-технология (High aspect ratio technologies) (позволяет реализовать высокое аспектное соотношение и дает возможность получения структур МЭМС с высоким отношением высоты к ширине, что позволяет создать узкие и глубокие канавки). Технология использует глубокое реактивное ионное травление на специальных установках, позволяющих осуществлять травление кремния на глубину примерно 100 мкм при хорошем выдерживании вертикальности стенок.

3. MUMPS-технология представляет трехслойную поликристаллическую поверхностную обработку.

4. Микростереолитография – это технология формирования изображения непосредственно в слое фоторезистора [11]. На пластину последовательно наносятся более 1000 слоев толщиной 1-5 мкм. Такая структура из полимерного материала может применяться самостоятельно или служить формой в LIGA технологии.

5. Микрообработка арсенида галлия. Специфические свойства GaAs и AlGaAs позволяют применять к этим материалам методы обработки, являющиеся развитием объёмной микрообработки.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Перечислите этапы кремниевой объёмной микрообработки.
2. Назовите особенности объёмной микрообработки.
3. Перечислите этапы кремниевой поверхностной микрообработки.
4. Назовите особенности поверхностной микрообработки.
2. Каковы основные этапы LIGA-технологии?
3. Назовите особенности LIGA –технологии.
4. Назовите этапы создания MUMPS-технологии.
5. Маскирование.
6. Окисление/травление – сухое и жидкое.
7. Гальваника.
8. Синхротрон.
9. Микростереолитография.
10. На чём базируются технологии изготовления МЭМС устройств?
11. Основные виды микрообработки МЭМС-устройств.
12. В чём суть объёмной микрообработки?
13. Виды маскирования полимерами и тонкими пленками при объёмной обработке.
14. Виды химического воздействия при объёмной обработке.
15. В чём состоит поверхностная микрообработка?
16. Для чего используется метод фотолитографии при поверхностной микрообработке?
17. Какие виды осаждения из паровой фазы применяется при поверхностной обработке?
18. Чем определяется геометрическая форма при поверхностной обработке?
19. Какой вид термического окисления используется при поверхностной обработке?
20. Цель высокопрофильной микрообработки.
21. Преимущества технологии LIGA.
22. Недостатки технологии LIGA.
23. Что позволяет SIGA-технология?
24. Этапы SIGA-технологии.
25. Что позволяет HART-технология?
26. Как могут использоваться структуры, полученные технологией микростереолитографии?

4. Методы анализа МЭМС-устройств

4.1. Метод аналогий в применении к анализу МЭМС

В конструкцию устройств МЭМС входят механические элементы, например пластины и мембраны, обладающие массой, жесткостью и энергией упругодеформируемого тела, а также электрические элементы (L , C , R , трансформаторы).

Для анализа такой системы можно использовать метод электромеханических аналогий, основанный на сопоставлении некоторых механических и электрических величин.

Представление механической системы в виде электрической цепи при последовательном соединении элементов относится к прямым методам аналогии. Метод хорошо применим для пьезоэлектрических систем, в которых напряжение или заряд прямо пропорциональны приложенной нагрузке. Проблемы возникают при интерпретации механических параллельных конфигураций в соответствующие электрические цепи с последовательной связью.

В другом методе аналогии («инверсная аналогия») механическую систему переводят в электрическую цепь с параллельным соединением элементов. Недостатком метода является то, что с увеличением частоты растёт эффект воздействия индуктивности и массы при одновременном уменьшении емкости и упругости. Но, несмотря на недостатки прямого и инверсного методов аналогии, они являются эффективными методами анализа устройств МЭМС. Коэффициент электромеханической связи R_v принят за числовой показатель эффективности преобразования электрической энергии в механическую.

Разные подсистемы для установки аналогии используют различное сопоставление электрических и механических величин. В таблице 4.1 приведены различные виды таких подсистем.

Таблица 4.1 – Виды подсистем, соответствующие им фазовые переменные и параметры элементов

Подсистема	Фазовые переменные		Параметры элементов		
	Тип потенциала, V	Типа потока, i	C	L	R
Электрическая	Электрическое напряжение	Электрический ток	Электрическая ёмкость	Электрическая индуктивность	Электрическое сопротивление
Механическая поступательная	Сила	Скорость	Масса	Гибкость	Механическое сопротивление
Механическая вращательная	Момент силы	Угловая скорость	Момент инерции	Вращательная гибкость	Вращательное сопротивление
Тепловая	Измерение температуры	Тепловой поток	Теплоёмкость	-	Тепловое сопротивление

Сопоставление механических параметров с электрическими представлено в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Сопоставление механических величин с аналогичными им электрическими величинами для метода аналогий

Механические величины	Электрические величины
Сила – F	Напряжение – V
Скорость – v	Ток – I
Перемещение – x	Заряд – q
Количество движения (импульс) – p	Магнитный поток – Φ
Вязкое трение – P	Сопротивление – R
Масса – m	Индуктивность – L

Упругость, жесткость пружины – k	Ёмкость – C
---------------------------------------	---------------

Пример для пружинного маятника и электрического колебательного контура приведен в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Суммирующая таблица для пружинного маятника и колебательного контура

Пружинный маятник	Колебательный контур
x – смещение	q – заряд
$v = \dot{x}$ – скорость	$i = \dot{q}$ – сила тока
$a = \ddot{x}$ – ускорение	$\frac{\partial i}{\partial t} = \ddot{q}$
m – масса	L – индуктивность
F – сила	V – ЭДС
$F = ma$ – Сила, характеризующая внешнее воздействие на систему	$V = L \frac{\partial i}{\partial t}$ – ЭДС, характеризующая внешнее воздействие на систему
$F = kx$	$V = \frac{Q}{C}$
k	$\frac{1}{C}$
$\frac{kx^2}{2}$ – Потенциальная энергия	$\frac{q^2}{2C}$ – энергия заряженного конденсатора
$\frac{mv^2}{2}$ – Кинетическая энергия	$\frac{Li^2}{2}$ – энергия индуктивности

Из-за наличия недостатков прямой и обратной аналогии для представления устройств МЭМС со сложной структурой при получении электрического эквивалента используют правила, специфичные для каждой конкретной структуры МЭМС.

Общие правила: элементы механической системы, делящие смещение, располагаются последовательно, а элементы, делящие силу - параллельно.

В качестве примера можно рассмотреть механическую систему в виде пружины демпфера-масса и соответствующую ей электрическую цепь (рисунок 4.1).

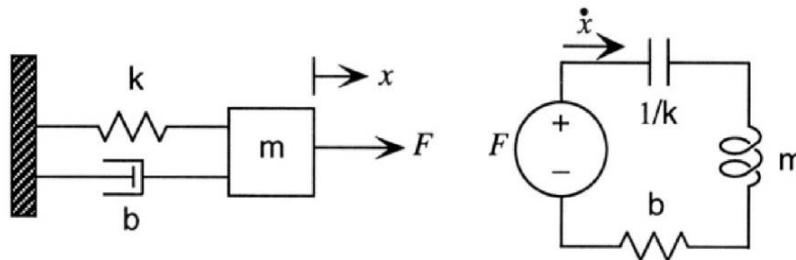


Рисунок 4.1 – Механическая система «пружина-демпфер-масса».

Здесь k - жесткость, b - вязкость, m - масса, F – сила, x – смещение.

Согласно второму закону Ньютона, имеем:

$$-F_{\text{внешняя}} + F_k + F_m + F_b = 0$$

Дифференциальное уравнение этой системы:

$$m_x \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + k_x x = F_{\text{внешняя}} = ma_{\text{внешняя}}$$

Электрическая аналогия имеет вид:

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{c} q = U(t)$$

Эти уравнения эквивалентны. Пользуясь таблицами 4.2 – 4.3, можно перейти от одного уравнения к другому и найти желаемую величину. Можно воспользоваться передаточной функцией как способом математического описания динамической системы.

На рисунке 4.2, 4.3 приведены примеры другой механической системы и соответствующая ей эквивалентная электрическая схема:

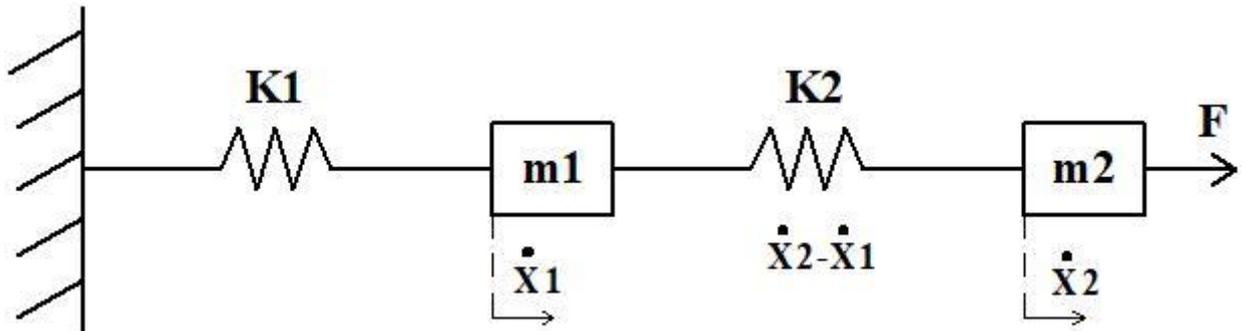


Рисунок 4.2 – Механическая система из двух масс и двух УЭ

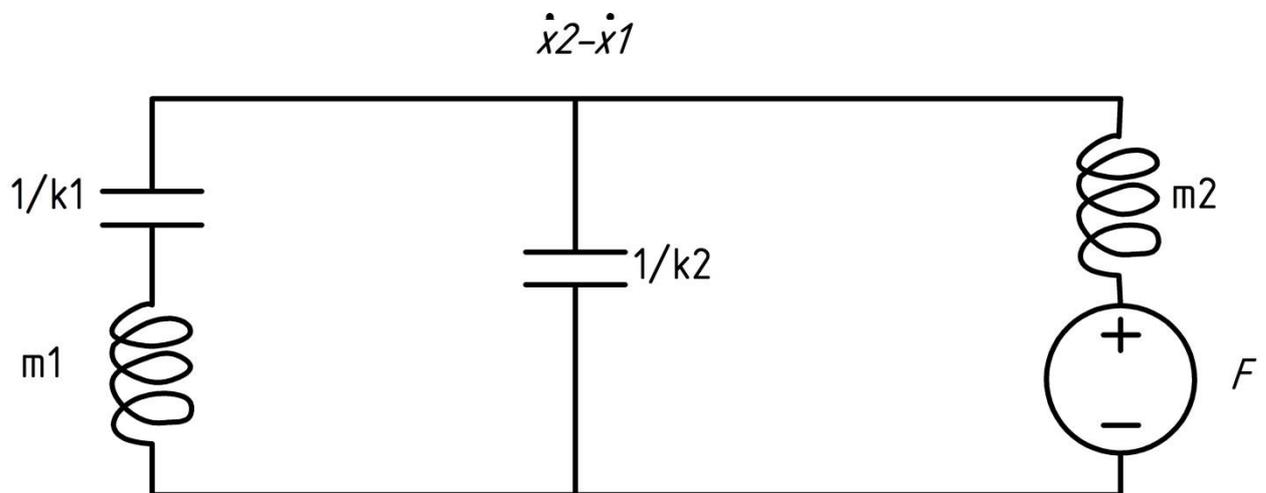


Рисунок 4.3 –Инверсная электрическая схема для механической системы из двух масс и двух УЭ

Для этого примера получим систему уравнений:

$$\text{Для массы } m_1: m_2 \ddot{x}_2 = F - k_2(x_2 - x_1).$$

$$\text{Для массы } m_2: m_1 \ddot{x}_1 = k_2(x_2 - x_1) - k_1(x_1),$$

где m_1 и m_2 - механические массы, \ddot{x}_1 и \ddot{x}_2 - соответствующие ускорения, F - сила, k_1 и k_2 - жесткость.

4.2. Метод анализа диссипативных процессов в МЭМС-структурах

Нагрев резистора, называемый джоулевой теплотой или резистивным (омическим) нагревом, описывает процесс перехода энергии электрического тока, протекающего через сопротивление в тепловую энергию (джоулево тепло). Не всегда джоулев нагрев полезен для устройств МЭМС. Он может быть и негативным эффектом. Выделение тепла относится к необратимым диссипативным процессам.

Примеры диссипативных процессов приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Диссипативные процессы

Подсистема	Диссипативный процесс
Движение твёрдого тела	Трение при контакте
Эластичность материала	Внутреннее трение
Электрическая	Джоулев нагрев, потери от диэлектриков
Магнитная	Вихревые токи, гистерезис
Жидкости	Вязкость
Химическая	Диффузия, химическая реакция
Тепловая	Теплопередача

Джоулево тепло, приводящее к самостоятельному нагреву полупроводникового резистора устройства МЭМС, сопровождающемуся тепловым расширением, может приводить к термомеханическим напряжениям, повреждениям и возникновению дефектов. Может меняться проводимость полупроводниковых структур, контактирующих с тепловым полем. Всё это критично скажется на ЧЭ датчика. Следовательно, тепловая энергия имеет большое значение для многообразных энергетических и электрических систем, входящих в устройство МЭМС.

4.3. Метод анализа МЭМС датчика на основе электрического конденсатора и механической пружины

Датчики МЭМС относятся к энергопреобразующим устройствам, то есть преобразуют один вид энергии в другой. Поэтому считается, что они содержат, по крайней мере, две энергетические подсистемы. Для анализа таких систем применяют метод, использующий мультипортовый элемент для соединения входов и выходов разных типов энергии.

Рассмотрим датчик, включающий в свой состав конденсатор, к которому между подвижной обкладкой и опорой добавлена пружина. При передвижении подвижной обкладки вниз пружина будет создавать ей противодействие. На рисунке 4.4 приведена электрическая и механическая подсистема такого датчика.

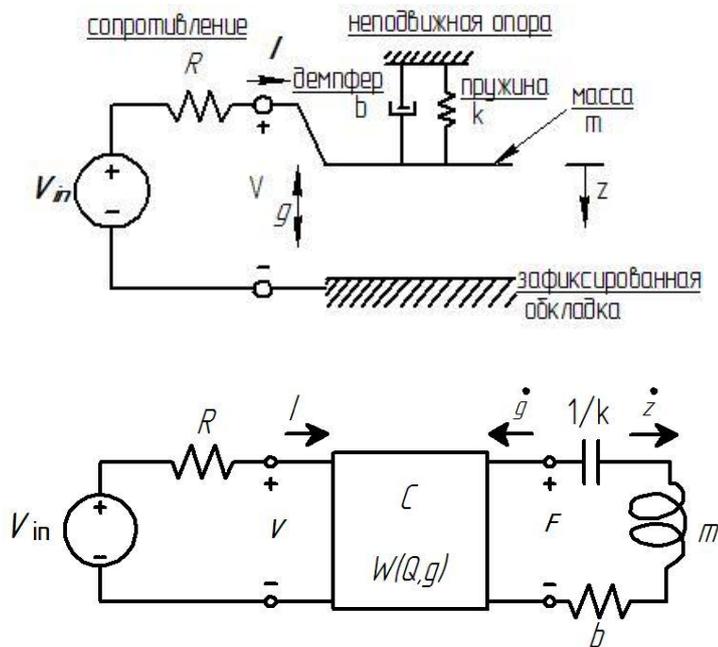


Рисунок 4.4 - Схема мультипортового элемента (электрическая и механическая подсистемы датчика).

Вопросы и задания для самоконтроля

1. На чём основан метод электромеханических аналогий?
2. Опишите прямой метод аналогии в применении к анализу МЭМС.
3. В чём заключается метод инверсной аналогии?
4. Виды подсистем сопоставления электрических и механических величин.
5. Сопоставление механических величин с аналогичными им электрическими величинами для метода аналогий.
6. Опишите метод анализа диссипативных процессов в МЭМС структурах.
7. Приведите примеры диссипативных процессов.
8. Метод анализа МЭМС датчиков как энергопотребляющих устройств.
9. Какие механические элементы не входят в конструкцию МЭМС устройств?
10. Какая характеристика не относится к механическим элементам МЭМС-устройств?
11. Какие электрические элементы не входят в конструкцию МЭМС-устройств?
12. На сопоставлении каких величин основано использование метода электромеханических аналогий?
13. Для каких систем хорошо применим метод электромеханических аналогий?
14. В чём суть метода "инверсной аналогии"?
15. Что принять за числовой показатель преобразования электрической энергии в механическую?
16. Какие подсистемы для установки аналогии используют различное сопоставление электрических и механических величин?
17. Сопоставление механических величин с аналогичными им электрическими величинами для метода аналогии. Каких из них не существует?
18. Какие виды энергии в методе аналогий являются сопоставимыми?
19. Общие правила для формирования электромеханической аналогии
20. Выбрать пример электротепловой аналогии
21. К каким процессам относится процесс выделения джоулева тепла?
22. Негативные эффекты от джоулева тепла в МЭМС устройствах?
23. Что используется для анализа систем, содержащих по крайней мере две энергетические подсистемы?
24. Какого сопоставления в методе аналогий не существует?

5. Системы автоматизированного проектирования для МЭМС

5.1 Компьютерное моделирование МЭМС

5.1.1 Моделирование в среде COMSOL

Существуют физические, математические и компьютерные методы анализа МЭМС. К компьютерному моделированию, в частности, относится моделирование в среде COMSOL. COMSOL Multiphysics — это программная среда, которая обеспечивает такие этапы моделирования, как определение геометрических размеров, описание физики процесса, визуализацию и так далее. Она дает возможность моделировать всё то, что представимо в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных. То есть позволяет моделировать механику конструкции, электротехнику, эффекты, связанные на микроуровне, а также оптические и частотные процессы.

COMSOL Multiphysics включает также модуль МЭМС, который предназначен для анализа физических процессов в сложных микроструктурах, таких как датчики, фильтры, регуляторы и другие. Можно моделировать физические явления в электромеханике, пьезоэффекты и явление теплопередачи. При анализе механических конструкций применим специальный модуль Structural Mechanics (механика конструкций). Термические приводы хорошо интегрируются с полупроводниковыми датчиками (Рисунок 5.1).

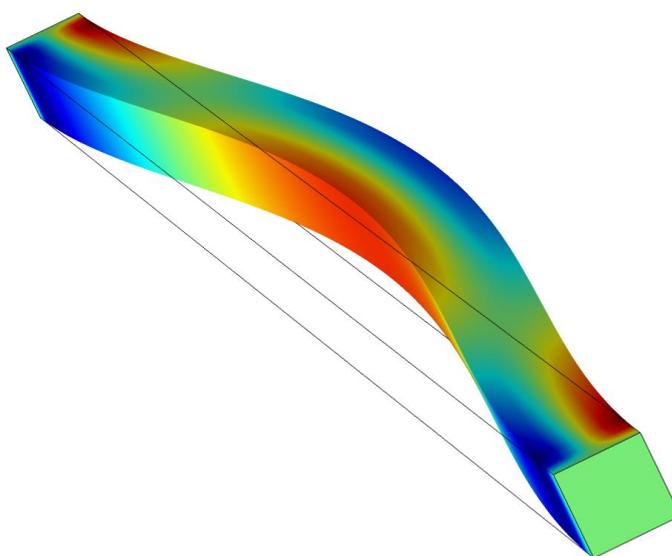


Рисунок 5.1 Термоупругость.

Модуль МЭМС может быть использован для моделирования джоулева нагрева (Рисунок 5.2) и появления термомеханических напряжений, а также тепловых потерь на сопротивлениях. Также в среде COMSOL эффективно моделируется пьезоэффект. При этом поля напряжений пьезорезистивных датчиков могут успешно рассчитываться с применением модуля МЭМС для элементов из пьезорезистивных материалов. При компьютерном моделировании таких датчиков в модуле МЭМС предоставляется ряд специализированных интерфейсов, предназначенных для осуществления процесса моделирования пьезорезистивного эффекта в твердых телах, например пьезокерамике и оболочечных конструкциях. Так, при совместном использовании модуля МЭМС и модуля Structural Mechanics (механика конструкций) применён интерфейс пьезорезистивного эффекта для тонких прямоугольных оболочечных мембранных элементов рисунок 5.2.

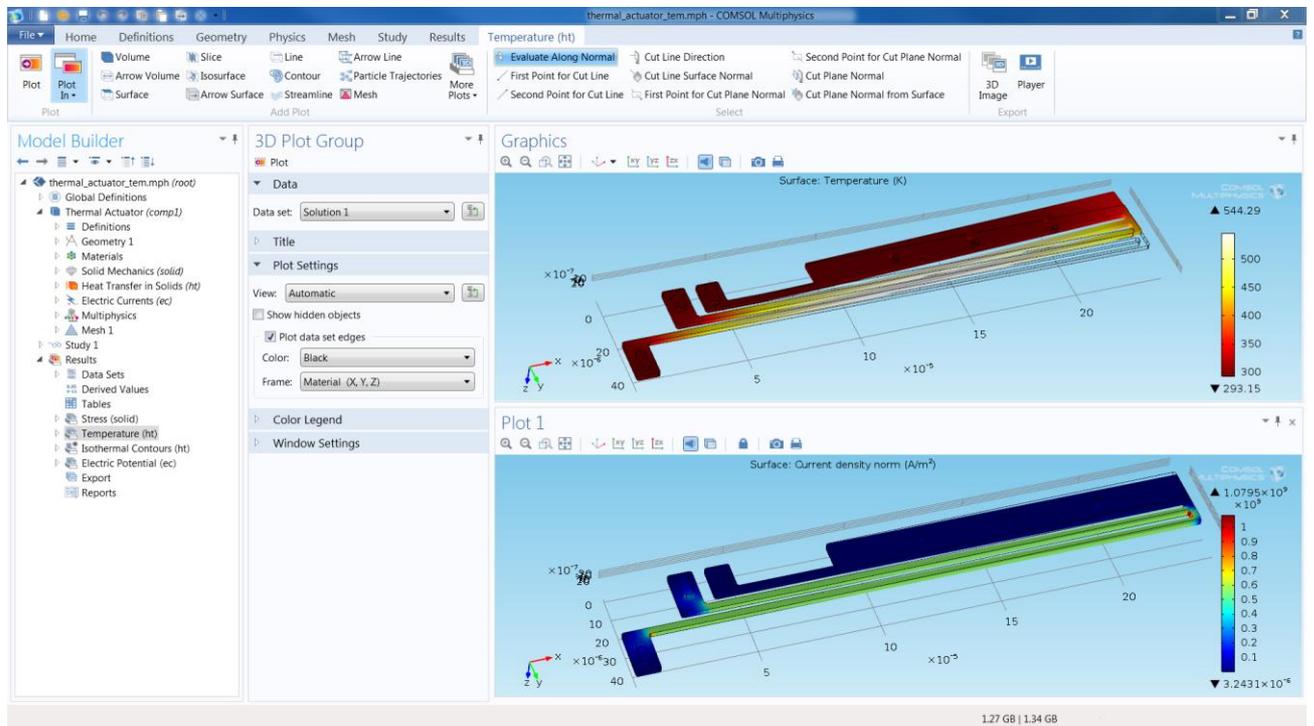


Рисунок 5.2 - Термический привод: вверху показана температура внутри смещенного термического привода с джоулевым нагревом, а внизу показано распределение плотности тока.

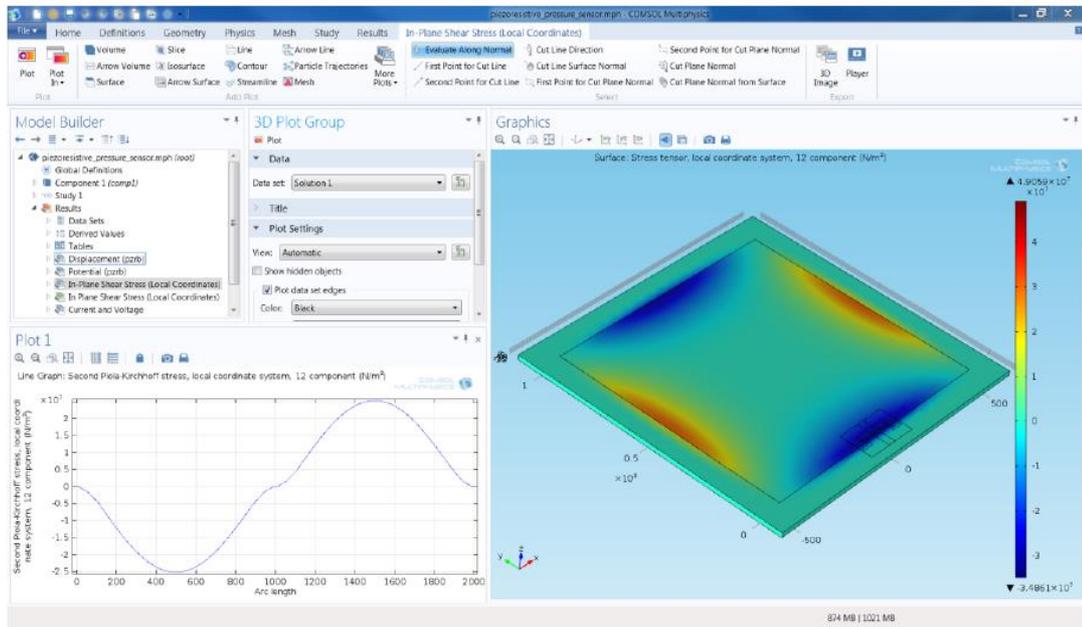


Рисунок 5.3 - Пьезорезистивный датчик: распределение напряжения пьезорезистивного датчика, рассчитанное с использованием пьезорезистивного интерфейса, предоставляемого модулем MEMS.

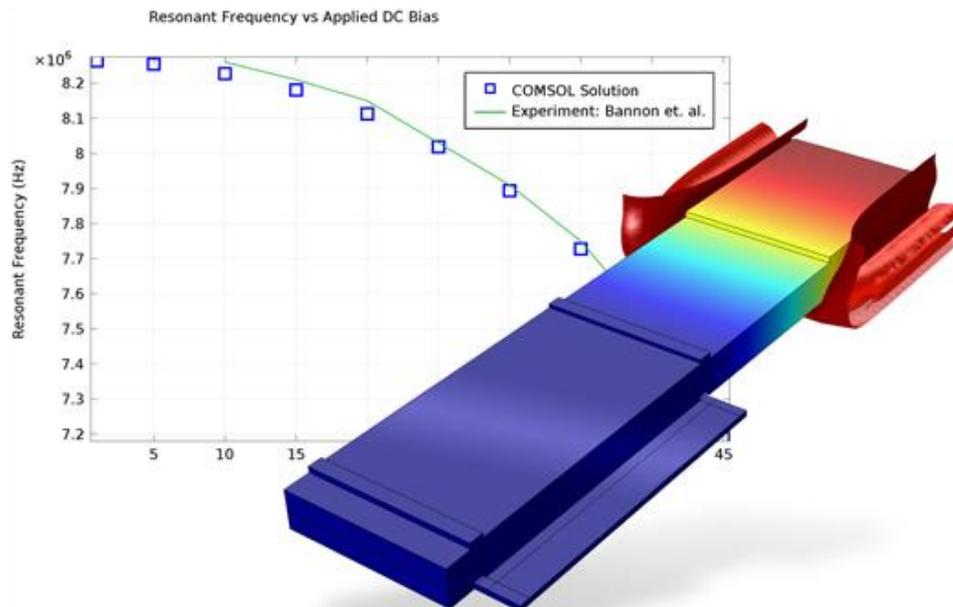


Рисунок 5.4 - Электростатический резонатор: моделирование статического МЭМС-резонатора с использованием электромеханического интерфейса модуля МЭМС.

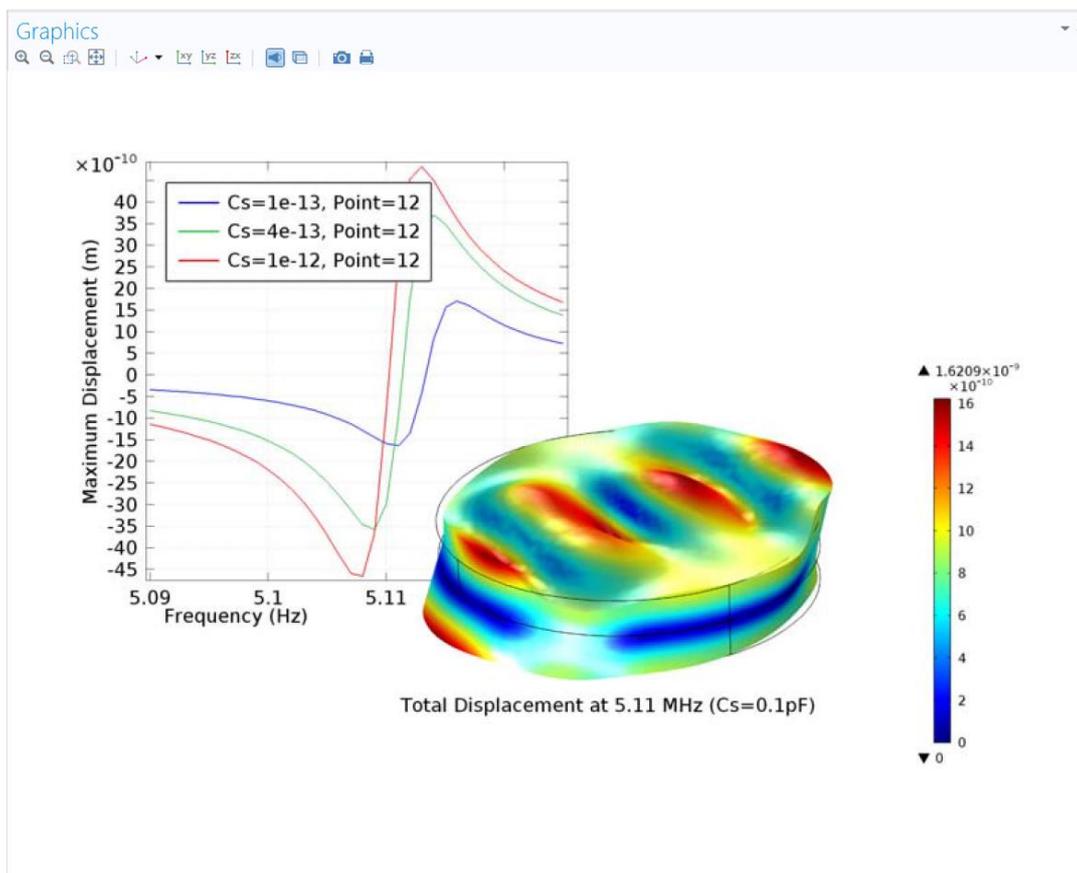


Рисунок 5.4 - Кристаллический резонатор: на графике показаны характеристики механической частотной характеристики вибрирующего тела из кристалла со сдвигом по толщине вместе с эффектом емкости.

Моделирование в среде COMSOL можно применять для решения прикладных задач физики, в которых применим численный метод конечных элементов, то есть используются дифференциальные уравнения в частных производных и интегральные уравнения. Поэтому этот метод широко используется при решении задач, основанных на теории механики упруго деформируемого тела. Он может быть применён к задачам теплообмена, гидродинамики и электродинамики.

5.1.2 Моделирование в среде SEMulator3D

Свои пакеты прикладных программ для компьютерного моделирования разработала и широко предлагает компания Coventor. Она создала среду SEMulator3D в целях моделирования процесса изготовления МЭМС и полупроводниковых технологий. При этом представляется виртуальная среда технологического процесса изготовления, полностью воспроизводящая возможности реальной технологической лаборатории по производству МЭМС. SEMulator3D может моделировать весь процесс интегрированных потоков, каждый из которых состоит из сотен отдельных процессов. Сейчас компания Coventor предлагает два взаимодополняющих программных продукта для проектирования и моделирования МЭМС. Это МЭМС+® и CoventorWare®, способные совместно обеспечить комплексную платформу для развития современных МЭМС. Эти сложные программные инструменты способны поддерживать моделирование сложных физических явлений, которые наблюдаются в процессе создания и эксплуатации МЭМС, такие как механические, электрические, пьезоэлектрические, пьезорезистивные, а также эффекты, возникающие на стадии упаковки чипа. В настоящее время компания Coventor предлагает решения как для проектирования самих МЭМС, так и для совместных сопровождающих их систем и электронных схем. С этой целью осуществлена интеграция технологии системного компьютерного моделирования и САПР инструментария, которые широко применяются в интегральных схемах и радиоэлектронике. Так, МЭМС +® является платформой для разработки устройств и их интеграции с КМОП-схемами, вплоть до технологии упаковки готового продукта. Данный модуль хорошо состыкуется с задачами проектирования и оптимизации компонентов МЭМС для датчиков движения, а именно, акселерометров и гироскопов. Применим он и для микрофонов, микрозеркал и микропереключателей.

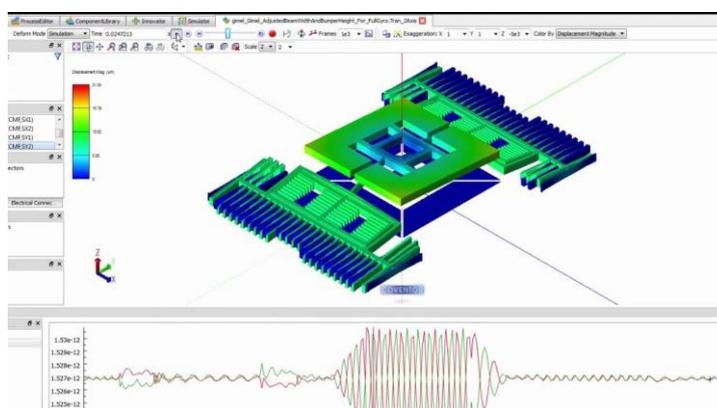


Рисунок 5.5 - Пример построения ЧЭ в среде Coventor.

5.2 Особенности автоматизированного проектирования МЭМС

Прежде чем приступить к разработке конструкции МЭМС или НиМЭМС, необходимо определиться с рядом моментов:

1. Четко представить назначение конструкции;
2. Осуществить выбор принципов преобразование энергии;
3. Создать принципиальную и функциональную схему конструкции;
4. Провести макетирование схемы компонентов конструкции;
5. Выбрать материал элементной базы конструкции и основные характеристики, способные обеспечить её функционирование;
6. Выбрать технологии обработки, разработка технологического процесса с учетом типа материалов и их совместимости;
7. Определиться с основными характеристиками (чувствительностью, массогабаритами, энергопотреблением и так далее);
8. Определиться со способом достижения желаемых характеристик с учетом вышесказанного;
9. Принять решение о необходимости в дополнительных элементах;
10. Описать параметры дополнительных элементов и оценить возможность их достижения;
11. Выбрать способ сборки в единое целое всех элементов конструкции;
12. Выбрать способ корпусирования готового изделия.

Методы оценки и математического моделирования позволяют определиться с основными характеристиками МЭМС. При этом оценочный метод дает возможность выбрать значение параметров в определенном диапазоне, что не дает полной информации. Тогда как математическое моделирование с получением уравнений позволяет найти решение для любой точки, включая всю поверхность мембранного элемента. Реализация математического моделирования осуществляется в настоящее время с помощью компьютерного моделирования с использованием методов САПР. Для этого важно выдерживать две позиции: быть уверенным в адекватности математической модели реальному процессу в объекте и в обоснованности выбора параметров модели.

Изделия микроэлектроники оценивают как планарные 2D, тогда как МЭМС представляет собой трехмерные объекты 3D. 3D конструкция при проектировании МЭМС может разделяться на: 3D блоки или 2D блоки (сечения). Тогда как для технологических процессов при формировании 3D структур используют 2D элементы, которые напыляются и стравливаются в ходе технологических операций. Планарное послойное удаление применяется при создании МЭМС входе механической и лазерной обработок, травлении, а также при напылении,

электроосаждении, полимеризации и стереолитографии, тогда как 3D элемент образуется только в ходе процессов литья и штамповки. Следовательно, послойное формирование 3D конструкции МЭМС возможно через нанесение и удаление 2D элементов. И это составляет основу технологии производства МЭМС. В процессах моделирования и проектирования объёмного варианта МЭМС, безусловно, требуется 3D модель, однако она базируется на 1D и 2D приближениях. Необходимо учитывать, что фрагменты декомпозиции конструкции в процессе моделирования могут не соответствовать технологическим фрагментам. Именно поэтому САПР МЭМС делится на:

- САПР функциональную;
- САПР схемотехническую;
- САПР топологическую;
- САПР технологическую;
- САПР для производства [13].

Благодаря планарности микросхем можно проводить коррекцию этапов САПР при топологическом проектировании фотошаблонов. В настоящее время метод поверхностной обработки в технологическом процессе последовательных этапов фотолитографии наиболее привлекателен для МСТ. При этом конструкцию микросхем можно рассматривать как планарную в химических датчиках, датчиках магнитного поля и так далее. Из-за того, что в МЭМС предусматривается присутствие компонентов, которые совершают механическое пространственное перемещение, они рассматриваются как 3D конструкция. Учет различных свойств материалов, из которых изготавливаются МЭМС, делает острой проблему селективности используемых методов обработки, а также их конструктивной и технологической совместимости. Необходимо считаться с тем, что корпус МЭМС обеспечивает требуемые контакты с окружающей средой по функциональным для МЭМС факторам. Следовательно, требования к конструкции корпуса МЭМС необходимо принимать во внимание на функциональном этапе проектирования. Всё вышеперечисленное указывает на то, что процесс создания САПР МЭМС гораздо сложнее по сравнению с САПР ИС [13].

5.3 Автоматизация процесса проектирования МЭМС

Для простых МЭМС-структур применима версия САПР ИС (пакет Magic VLSI), а также САПР для конструирования AutoCAD, имеющая интерфейс для генерирования шаблонов, PATRAN и I-DEAS. А для процесса моделирования технологических процессов применяется SAMPLE. Физические процессы моделирования с помощью ABAQUS базируются на методе конечных элементов FAST-CAP (MEMCAP), а для моделирования электростатики применим метод граничных элементов (boundary-element).

Далее создали САПР МЭМС: Oyster (IBM), MEMS CAD (MIT), CAEMEMS (Univ.Michigan), SESES (ETM) [10]. Эти САПР ориентированы на объемную микрообработку кремния, а также поверхностную микрообработку поликремния.

Развитием МЭМС CAD стал программный пакет МЭМС Pro. Он моделировал влияние внешней среды на МЭМС.

Сейчас САПР МЭМС интегрируют 2D-системы для ИС с 3D-системами для МЭМС с учетом большого ассортимента видов микрообработки и материалов.

Из-за композиционной сложности МЭМС приходится объединять САПР МЭМС с пакетами различных программ, поэтому при сквозном моделировании МЭМС главная проблема состоит в согласовании параметров этих программ.

Этапы процесса моделирования МЭМС - следующие:

1. В процессе моделирования МЭМС необходимо выделить важные для них физические эффекты и определить их взаимосвязь (на основе этого осуществляют выбор определенного модуля программ);
2. Формирование геометрии прибора путем использования редакторов геометрии или моделирования технологии изготовления;
3. Учет входных параметров, а также граничных условий и свойств материала (это ведет к разбивке на сетку для процесса вычислений);
4. Осуществляется моделирование с использованием программ Nastran, Conventor, Ansys, Comsole (основанных на методе конечных элементов, граничных элементов, конечных разностей или конечных объемов) [14];
5. По результатам моделирования [14] создают упрощенные модели для разработки систем;

6. Для моделирования на системном уровне используют программные пакеты моделирования электрических схем SPICE, Simulink и Saber, использующий язык VHDL-AMS.

Требования времени привели к созданию компанией ANSYS Inc. собственного языка программирования APDL для решения проблем, связанных с многодисциплинарными задачами, а также был создан интегрированный модуль CFD и модуль оптимизации. Всё это позволило перейти к расчетам на персональных компьютерах. Достоинства программы заключаются в совместимости файлов всей линейки программных продуктов ANSYS для всех поддерживаемых платформ.

Программная платформа компании ANSYS Workbench дает возможность интегрировать модуль для осуществления многодисциплинарного анализа в едином информационном пространстве. При этом нет затрат на передачу данных между приложениями и на интерпретацию результатов при переходе в другую систему.

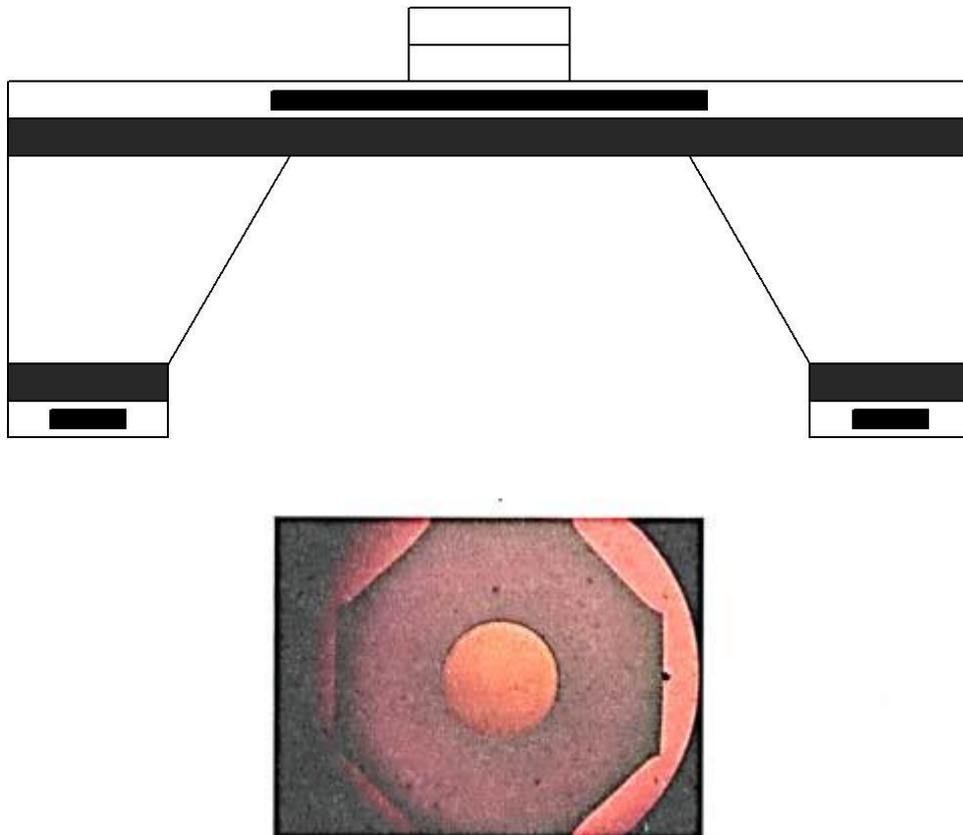


Рисунок 5.6 - Модель диафрагмы с жестким центром

На рисунке показан процесс моделирования диафрагмы с жёстким центром. Такая структура используется в ММДД, микрофонах, ММА. Варьируемые параметры: форма диафрагмы, толщина слоев, размеры жесткого центра, материал, величина и характер нагрузки ЧЭ.

Вначале делается анализ гладких диафрагм различной геометрии (круг, восьмиугольник, шестиугольник, квадрат). Результаты сравниваются с теоретическими аналитическими расчетами для соответствующих форм диафрагм. Было определено, что смещение однородных одинаковой толщины мембран убывает в следующей последовательности: квадрат, круг, шестиугольник, треугольник. Эта последовательность сохранялась до толщины слоя $SiO_2 \geq 0,2 \text{ мкм}$. Тогда как при уменьшении толщины до $0,1 \text{ мкм}$ последовательность становилась другой: восьмиугольник, круг, квадрат, шестиугольник.

Дальше проводился ряд экспериментов при одинаковых геометрических параметрах и различной плотности сетки. Так определяется оптимальное количество элементов. В данном случае - 20000 элементов.

Однако имеется общий распространённый недостаток коммерческих программ САПР. Это отсутствие информации о математических зависимостях, лежащих в основе модели. Несостыковка компьютерной модели МЭМС и реального процесса проявляется также при комплексном моделировании при сочетании различных программ моделирования.

Основной задачей всех способов проектирования является быстрый переход к изготовлению опытного образца. На этом этапе важны тестовые образцы для коррекции результатов.

Стремясь к сокращению сроков выхода своей продукции на рынок, удастся перейти от обычных 5-10 лет к 2,5 годам.

Для повышения гибкости анализа модели конструкции представляется целесообразным проведение предварительных оценок параметров конструкции. Если использовать только стандартные программы, может возникнуть проблема адекватности модели параметрам конструкции. Подлинную гарантию адекватности может дать только эксперимент. Требуется наличие библиотеки параметров используемых материалов, а также редакторы для послойного описания топологии двумерных подсистем, для объединения их в трехмерную

структуру. Необходимы эмуляторы технологических процессов с набором множества его параметров, а также модуль визуализации конечных результатов. Процесс проектирования МЭМС узла в среднем составляет 7 дней. Далее идут уточняющие итерации, и тогда полный цикл проектирования [4] МЭМС узла составит 3 месяца.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Вопросы, стоящие перед проектировщиком МЭМС.
2. Этапы процесса моделирования МЭМС.
3. Причины расхождения результатов моделирования МЭМС и её реального поведения.
4. Элементы типовой САПР МЭМС.
5. Перечислите возможности программной системы MEMS Pro.
6. Конфигурации системы MEMS Pro.
7. Перечислите возможности модуля MEMS Master.
8. В чем заключаются преимущества и недостатки метода конечных элементов (FEM)?
9. Существующие конфигурации MEMS Explorer.
10. Какие существуют комплекты для проектирования (Design Kits) фирмы MEMSCAP?
11. Элементы САПР CoventorWare.
12. Возможности программного пакета MEMS+.
13. Какие виды анализа доступны в системе ANALYZER?
14. Какие поведенческие модели доступны в системе ARCHITECT?
15. Назначение пакета SEMulator3D.
16. Модули САПР IntelliSuite Comprehensive.
17. Состав набора решателей Fastfield Multiphysics.
18. Назначение программы SYNPLE.
19. Методы анализа МЭМС.
20. Что позволяет моделирование в среде Comsol Multiphysics?
21. Какой модуль среды Comsol Multiphysics используется при анализе механических конструкций?
22. Что можно моделировать при совместном использовании модуля МЭМС и модуля Structural Mechanics?
23. При каких условиях можно применять моделирование в среде Comsol для решения прикладных задач физики?
24. Для каких разделов физики хорошо применимо моделирование в среде Comsol?
25. Что позволяет моделировать среда Simulator 3D?
26. Каковы возможности двух взаимодополняющих программных продуктов MEMS + R и Converter Ware?
27. Что помогает определиться с выбором основных характеристик МЭМС в процессе их автоматизированного проектирования?

28. Какие позиции важно выдерживать при компьютерном моделировании с использованием методов САПР?
29. Как оцениваются изделия микроэлектроники?
30. Какие технологические процессы позволяют получить трехмерные 3D объекты?
31. Как реализуется послойное формирование 3D конструкции МЭМС?
32. На сколько видов делится САПР МЭМС?
33. Каковы этапы процесса моделирования МЭМС?
34. Каковы достоинства и возможности программного продукта ANSYS?
35. Что необходимо для обеспечения адекватности модели реальному процессу?

Заключение

Материал, изложенный в данном учебном пособии, должен стать фундаментом, на основе которого студенты смогут совершенствовать свои знания в области МЭМС и датчиков на их основе.

Рассмотрены технологические особенности реализации структур МЭМС, приведены методы анализа устройств МЭМС, в частности, описан перспективный метод электромеханических аналогий. Описаны различные типы систем автоматизированного проектирования, которые базируются на использовании специализированного программного обеспечения мировых лидеров в области разработки МЭМС. Обучающимся рекомендовано при изучении данного учебного пособия и дисциплины «Микроэлектромеханические системы и датчики» сделать акцент на самостоятельное проведение патентных исследований по данному вопросу. Вопросы и задания для самоконтроля, приведенные в конце каждой главы, должны помочь обучающимся закрепить изученный материал и стимулировать их к расширенному изучению литературы по данной теме.

Список литературы

1. Баринов И.Н., Волков В.С. Микромеханика вокруг нас. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://dep_pribor.pnzgu.ru/files/dep_pribor.pnzgu.ru/mikromehnika_vokrug_nas.pdf
2. Гуртов В. А., Беляев М. А., Бакшеева А.Г. Микроэлектромеханические системы: Учеб.пособие . – Петрозаводск: Из-во ПетрГУ, 2016. –171с
3. Ануфриев Л.П., Бордусов С.В., Гурский Л.И., Достанко А.П., Керенцев А.Ф., Ковальчук Н.С., Коробко А. О., Ланин В.Л., Осипов А.А., Портнов Л.Я., Рубцевич И.И., Соловьев Я.А., Солодуха В.А., Становский В.В. Технология интегральной электроники. Минск: «Интегралполиграф», 2009. – 379 с.
4. Белов Л. МЭМС-компоненты и узлы радиочастотной аппаратуры. Электроника: Наука, технология, бизнес. 2008, №2. – 20-29 с.
5. Распопов В.Я. Микромеханические приборы. – М.: Машиностроение, 2007 – 400 с.
6. Базылев Д.Н., Викснин И.И., Кремлев А.С., Маргун А.А., Юрьева Р.А. Электромеханический привод. Устройство и управление: Учебное пособие. - Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2020. - 34 с.
7. Мусалимов В.М., Ротц Ю.А., Астафьев С.А., Амвросьева А.В. Расчёт надёжности упругих элементов микромеханических гироскопов - Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2012. - 127 с.
8. Базылев Д.Н., Викснин И.И., Кремлев А.С., Маргун А.А., Юрьева Р.А. Электромеханический привод. Устройство и управление: Учебное пособие. - Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2020. - 34 с.
9. Калинкина М.Е., Коробейников А.Г., Лабковская Р.Я., Пирожникова О.И., Ткалич В.Л., Шмаков Н.А. Анализ параметров интегральных датчиков давления с термостабильным чувствительным элементом // Научно-технический вестник Поволжья -2019. - № 1. - С. 81-83
10. Иванов С.В., Карелин Е.Ю. Основы технологии кремниевой микрообработки // Труды международного симпозиума Надежность и качество. 2011. - Т. 2. - С. 158-160.
11. Технологические основы и особенности создания НЭМС и МЭМС. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.sgu.ru/sites/default/files/textdocsfiles/2014/12/15/mems_gl_04.doc
12. Гуртов В.А., Беляев М.А., Бакшеева А.Г. Микроэлектромеханические системы: Учеб.пособие . – Петрозаводск: Из-во ПетрГУ, 2016. –171с
13. Невлюдов И.Ш., Евсеев В.В., Бортникова В.О., Анализ современных средств автоматизированного проектирования микроэлектромеханических систем

«Технология приборостроения» научно-техническом журнал «ГП НИТИП» №1, 2014. – X.: 2014. – 47 с.

14. Гобыш А.В., Шокина Н.Ю. Анализ вычислительных схем методов конечных элементов и конечных разностей для моделирования течений несжимаемой жидкости // Вычислительные технологии. – 2006. – Том 11. – № 6. С. 22–31.

Приложение 1

Области применения микромеханических приборов

Отрасль	Область применения
Медицина	<ol style="list-style-type: none"> 1. Оперативные и имплантируемые ММДД. 2. Электрокардиостимуляторы с встроенными ММА. 3. Интеллектуальные системы протезирования с функциями контроля (ММА и ММГ) за пространственным положением и перемещением исполнительных органов. 4. "Сенсорная" перчатка (пять ММА на кончиках пальцев перчатки и один ММА с обратной стороны руки) с программой обработки данных, позволяющая контролировать положение руки и каждого пальца [5].
Энергетика	<ol style="list-style-type: none"> 1. Системы контроля давления, расхода (ММДД) и температуры теплоносителей и хладагентов. 2. Системы контроля за допустимыми уровнями вибрации и сейсмической активности на базе ММА (особенно актуально для темной энергетики). 3. Технологические роботы в атомной энергетике. Контроль за положением и скоростями перемещаемых объектов (ММА и ММГ), а также самодиагностика систем управления робота [5].
Нефтяная и газовая промышленность	<ol style="list-style-type: none"> 1. Навигационное обеспечение (ММА и ММГ, комплексированные с другими источниками информации) 2. инклинометрии (контроль и управление бурением глубоких и сверхглубоких скважин; каротаж скважин). 3. Навигационное обеспечение систем контроля за состоянием геометрии трубопроводов на больших, в том числе трансконтинентальных расстояниях. 4. ММДД и расходомеры на их основе, работающие в агрессивных средах 5. Вибродиагностика на базе ММА состояния компрессоров на станциях перекачки нефтепродуктов [5].
Автомобилестроение	<ol style="list-style-type: none"> 1. Системы навигации на базе ММА и ММГ, комплексированные с другими источниками информации. 2. Системы безопасности на базе ММА и ММГ, исключаящие занос автомобиля при торможении, и обеспечивающие срабатывание подушек безопасности. 3. Контроль давления (ММДД) в системах: топливной,

	смазочной, кондиционирования, в "интеллектуальных" шинах [5].
Оборона	<ol style="list-style-type: none"> 1. Системы пешеходной навигации (ММА и ММГ, комплексированные с другими источниками информации). 2. Системы навигации и стабилизации беспилотных управляемых малоразмерных летательных аппаратов на базе ММА, ММГ и ММДД (высотомеров и датчиков скорости на их базе) и магнитных указателей курса (разведка, постановка электронных помех). 3. Системы управления и навигации боевыми наземными и подводными роботами. 4. Системы управления боеприпасами на базе ММА и ММГ, комплексированные с другими датчиками [5].

Пирожникова Ольга Игоревна
Ткалич Вера Леонидовна
Калинкина Мария Евгеньевна
Комарова Антонина Владиславовна

Микроэлектромеханические системы и датчики

Учебное пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, литер А