



МИР Электроники

А.И. Белоус, С.А. Чижик

**МЭМС: конструкции,
технологии, приложения**

ТЕХНОСФЕРА
Москва
2024

*Издано при финансовой поддержке Министерства цифрового развития,
связи и массовых коммуникаций Российской Федерации*

УДК 004.492
ББК 32.85
Б43

Б43 Белоус А.И., Чижик С.А.

МЭМС: конструкции, технологии, приложения
Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2024. – 620 с. ISBN 978-5-94836-688-3

В книге представлены систематизированные результаты детального анализа современного состояния и перспектив развития одного из наиболее стремительно развивающихся на стыке микромеханики и микроэлектроники научно-технических направлений – микроэлектромеханических систем (МЭМС).

Книга ориентирована на достаточно широкую аудиторию – от студентов, аспирантов и преподавателей технических вузов, специализирующихся в области микроэлектроники, до инженеров – разработчиков микросхем и электронных систем на их основе, инженеров – технологов серийных производств, сотрудников отраслевых исследовательских лабораторий и академических институтов, специалистов радиоэлектронной, автомобильной и космической техники.

В восемнадцати тематических главах последовательно на конкретных примерах рассмотрены все основные этапы создания МЭМС, начиная от анализа типовых конструкций классических датчиков и гироскопов, особенностей реализации этих конструкций в виде МЭМС-устройств, основных технологических процессов изготовления МЭМС, методов и технологий корпусирования МЭМС-устройств, инструментов моделирования и проектирования и заканчивая стандартами, видами и методами испытаний МЭМС-устройств.

Подробно в объеме отдельных глав рассмотрены особенности технологии и конструкции оптических МЭМС (ОМЭМС), наноэлектромеханических систем (НЭМС), а также основные сферы применения МЭМС – автомобилестроение (противоугольные и навигационные системы, системы безопасности, датчики давления в шинах, датчики электронных систем управления двигателями, обеспечение курсовой устойчивости, управления тормозами и т.д.), биомедицинские приложения МЭМС (био-МЭМС, применения в хирургии, офтальмологии, имплантируемые датчики, для обработки внутрисердечных сигналов, для систем электроэнцефалограмм, в томографии, микрофлюидные кристаллы и др.), а также СВЧ-приложения.

Завершает книгу глава, посвященная бесплатформенным инерциальным навигационным системам ориентации и навигации на основе МЭМС-датчиков (принципы построения, методы калибровки инерциальных чувствительных элементов, информационно-управляющие системы вращающихся по крену летательных аппаратов).

УДК 004.492
ББК 32.85

© Белоус А.И., Чижик С.А., 2024
© АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление, 2024

ISBN 978-5-94836-688-3

Содержание

Предисловие	12
Введение	15
Глава 1. Иллюстрированное введение в проблемы МЭМС.....	21
1.1. Краткая история развития МЭМС	21
1.2. Основные типы и конструкции МЭМС-устройств	28
Глава 2. Датчики силы и крутящего момента.....	44
2.1. Введение	44
2.2. Тензодатчики	45
2.3. Резонансные и ПАВ-датчики	49
2.4. Оптические микродатчики	52
2.5. Емкостные датчики измерения	53
2.6. Магнитные датчики	55
2.7. Атомно-силовой микроскоп и сканирующие зонды.....	57
2.8. Тактильные датчики	59
Глава 3. Датчики давления	64
3.1. Введение	64
3.2. Теоретические основы методов измерения давления.....	65
3.2.1. Основополагающие принципы измерения давления	65
3.2.2. Технические характеристики датчика давления	69
3.2.2.1. Нуль/смещение и гистерезис нуля по давлению.....	69
3.2.2.2. Линейность датчика	69
3.2.2.3. Гистерезис	70
3.2.2.4. Чувствительность.....	71
3.2.2.5. Долгосрочный дрейф.....	71
3.2.2.6. Влияние температуры.....	71
3.2.3. Динамическое измерение давления	71
3.2.4. Типы датчиков давления	72
3.3. Традиционные датчики давления	73
3.3.1. Манометр.....	73
3.3.2. Барометры-анероиды.....	74
3.3.3. Трубка Бурдона.....	74
3.3.4. Датчики вакуума.....	75
3.4. Мембранные датчики давления.....	75
3.4.1. Анализ диафрагмы малого отклонения.....	77
3.4.2. Анализ диафрагмы среднего отклонения.....	79
3.4.3. Расчет значений величин напряжений мембраны.....	79
3.4.4. Особенности расчета мембраны с выступами.....	80
3.4.5. Особенности расчета гофрированных диафрагм.....	81
3.4.6. Традиционные способы реализации трансдукции диафрагм	82
3.5. Датчики давления на основе технологии МЭМС.....	83

3.5.1. Конструктивные особенности микрообработанных кремниевых диафрагм	83
3.5.2. Пьезорезистивные МЭМС-датчики давления.....	84
3.5.3. Емкостные МЭМС-датчики давления	90
3.5.4. Датчики резонансного давления	93
3.5.5. Другие методы измерения давления с использованием МЭМС-технологий.....	96
3.6. МЭМС-микрофоны	97
3.7. Конструктивные особенности МЭМС-датчиков давления	100
3.7.1. Классификация современных МЭМС-датчиков давления.....	100
3.7.2. Конструкции чувствительных элементов микродатчиков давления	101
3.7.3. Типовые конструкции МЭМС-микродатчиков давления.....	106
Глава 4. МЭМС-актюаторы: классификация, принципы функционирования.....	117
4.1. Классификация типов МЭМС-актюаторов.....	117
4.2. Электростатические актюаторы	117
4.3. Магнитные актюаторы.....	119
4.4. Пьезоэлектрические актюаторы.....	120
4.5. Гидравлические актюаторы.....	122
4.6. Тепловые актюаторы	122
Глава 5. Микромеханические микродвигатели и МЭМС-транспортёры.....	126
5.1. Микромеханические микродвигатели.....	126
5.1.1. Гребенчатые микродвигатели.....	127
5.1.2. Зубчатые микродвигатели.....	128
5.1.3. Роторные микродвигатели	129
5.1.4. Устройства фиксации	130
5.1.5. Микрорычаги	131
5.1.6. Микроблокираторы.....	133
5.2. МЭМС-транспортёры	133
5.2.1. Конструкция и принципы действия МЭМС-транспортёров.....	133
5.2.2. МЭМС-турбина.....	138
5.2.3. МЭМС-аналог парового двигателя	139
5.2.4. МЭМС-приводы	140
Глава 6. МЭМС-акселерометры: классификация, конструкции, принципы работы	145
6.1. Классификация и основные определения микромеханических акселерометров	145
6.2. Осевые микроакселерометры	148
6.3. Маятниковые микроакселерометры	155
6.4. Конструкции и принципы работы чувствительных элементов МЭМС акселерометров	159
6.5. Особенности организации измерительных цепей емкостных датчиков	163

6.6. Пример практической разработки электрической структурной схемы измерительного преобразователя	170
6.7. Методика разработки электрической функциональной схемы измерительного преобразователя	170
6.8. Методика разработки электрической принципиальной схемы измерительного преобразователя	180
6.9. Пример расчета параметров элементов измерительной цепи	180
Глава 7. МЭМС-гироскопы: классификация, конструкции, принципы работы	185
7.1. Классификация и принципы работы гироскопов	185
7.2. Двухмассовые микрогироскопы	197
7.3. Микрогироскопы LR-типа	201
7.4. Микрогироскопы RR-типа	204
7.5. Камертонные и волновые микрогироскопы	215
7.6. Популярное описание конструкции и принципа работы МЭМС-гироскопа с вибрирующим кремниевым кольцом	221
Глава 8. МЭМС-устройства генерирования и аккумуляции энергии	228
8.1. Области применения МЭМС-аккумуляторов	228
8.2. Пьезоэлектрические МЭМС-устройства аккумуляции энергии	230
8.2.1. Наногенераторы	230
8.2.2. МЭМС-аккумулятор для контактных линз	233
8.3. Электрические МЭМС-устройства аккумуляции энергии	234
Глава 9. Основы технологии изготовления МЭМС	237
9.1. Введение	237
9.2. Технологии микрообработки МЭМС-устройств	239
9.2.1. Объемная микрообработка кремния	240
9.2.2. Поверхностная микрообработка кремния	242
9.2.3. Микрообработка полимерных МЭМС-устройств	245
9.2.4. 3D-микротехнологии	246
9.3. Соединение кремниевых пластин МЭМС	248
9.3.1. Сварка кремния плавлением	249
9.3.2. Анодное соединение кремния со стеклом	249
9.3.3. Соединение с помощью промежуточных слоев	251
9.3.4. Клеевое соединение	252
9.3.5. Вакуумная сварка	252
9.3.6. Выравнивание соединений	252
9.3.7. Толсто пленочная трафаретная печать	252
9.3.8. Гальваника	254
9.3.9. Техпроцесс LIGA	255
9.3.10. Пористый кремний	257
9.3.11. Остановка процесса электрохимического травления	258

9.4. Технологические методы осаждения материалов, используемых при изготовлении МЭМС	259
9.4.1. Термическое выращивание	259
9.4.2. Химическое осаждение из паровой фазы	260
9.4.3. Поликремний и аморфный кремний	261
9.4.4. Эпитаксия	261
9.4.5. Нитрид кремния	262
9.4.6. Диоксид кремния	263
9.4.7. Осаждение металлов	265
9.4.8. Легированный кремний	265
9.5. Технологические особенности процессов фотолитографии МЭМС-устройств	266
9.5.1. Двусторонняя фотолитография	266
9.5.2. Литография в оттенках серого цвета	267
9.5.3. Толстые и ламинированные фоторезисты	268
9.5.4. Взрывная фотолитография	268
9.5.5. Топография	269
9.6. Травление МЭМС-структур	270
9.6.1. Мокрое изотропное травление кремния	271
9.6.2. Мокрое анизотропное травление кремния	271
9.6.3. Сухое изотропное травление кремния	278
9.6.4. Сухое анизотропное травление кремния	278
Глава 10. Технологии и конструкции оптических МЭМС	282
10.1. Области применения оптических МЭМС	282
10.2. Технологии и конструкции ОМЭМС	284
10.2.1. МЭМС-дисплеи семейства Qualcomm	284
10.2.2. Технологии DLP/DMD	288
10.2.3. Технология 3D Ready	293
10.2.4. Технология BrilliantColor	293
10.2.5. Технология GLV	294
10.2.6. Технологии Grating Light Valve (GLV)	294
10.2.7. Микрозеркальные технологии Microvision	297
10.2.8. Сканирующая микрозеркальная технология Maradine	300
10.2.9. Сканирующая МЭМС-технология bTendo	301
10.2.10. О перспективах и безопасности лазерной технологии проецирования	304
10.2.11. Другие перспективные дисплейные технологии	309
10.3. Оптические МЭМС-устройства для компактных камер 3D-визуализации	310
10.3.1. Введение	310
10.3.2. Традиционные методы 3D-визуализации поверхности	311
10.3.3. Оптические МЭМС-устройства для 3D-визуализации	313

Глава 11. Методы и технологии корпусирования МЭМС-устройств	324
11.1. Основные направления развития технологий корпусирования МЭМС.....	324
11.2. Методы корпусирования кристаллов МЭМС-устройств	330
11.2.1. Корпусирование кристаллов с помощью монокристаллических капсул	330
11.2.2. Корпусирование с помощью пайки стеклокерамическим припоем	332
11.2.3. Корпусирование методом объемной поверхностной микрообработки	333
11.3. Методы корпусирования на уровне пластины WLP	336
11.3.1. Метод тонкопленочного корпусирования	336
11.3.2. Герметизация с помощью лазерного оплавления	337
11.3.3. Корпусирование МЭМ-структур, выполненных в объеме кремниевой пластины	338
11.3.4. Корпусирование МЭМС-структур, выполненных с применением термопластичных материалов	339
11.3.5. Корпусирование МЭМС методом электрохимического осаждения	343
11.4. Особенности технологического маршрута формирования 3D-межсоединений	346
11.5. Особенности технологии вакуум-плотной герметизации МЭМС и вакуумирования.....	355
11.5.1. Технология вакуум-плотной герметизации МЭМС.....	355
11.5.2. Применение газопоглотителей для создания и поддержки вакуума	357
11.6. Базовые операции технологических маршрутов корпусирования МЭМС-устройств	359
11.6.1. Введение в проблему	359
11.6.2. Конструктивно-технологические особенности сборки механических датчиков МЭМС	360
11.6.2.1. Защита датчика от воздействия окружающей среды	361
11.6.2.2. Защита окружающей среды от датчика	365
11.6.3. Механическая изоляция сенсорных кристаллов.....	366
11.6.3.1. Базовый этап сборки МЭМС-датчика	367
11.6.3.2. Механическая развязка конструкции корпуса.....	368
11.6.3.3. Другие конструктивные решения механической изоляции датчиков.....	370
11.6.3.4. Использование пластичных клеев.....	371
Глава 12. Основы проектирования МЭМС	378
12.1. Введение.....	378
12.2. Инструменты моделирования и проектирования МЭМС.....	379
12.2.1. Инструменты моделирования поведенческих моделей.....	379
12.2.1.1. Matlab и Simulink.....	379

12.2.1.2. Spice-моделирование МЭМС	383
12.2.1.3. Другие симуляторы системного уровня	384
12.2.2. Инструменты моделирования МЭМС методом конечных элементов	384
12.2.2.1. Программное обеспечение CoventorWare.....	384
12.2.2.2. IntelliSuite.....	390
12.2.2.3. ANSYS (ANSYS Inc.)	393
12.3. Особенности проектирования МЭМС в среде CoventorMP.....	396
12.3.1. Программный комплекс МЭМС+	396
12.3.2. CoventorWare	400
12.3.3. Интерактивная справочная система платформы CoventorMP	403
12.4. Другие системы автоматизированного проектирования устройств на основе МЭМС.....	404
12.4.1. Дополнительные инструменты для компьютерного моделирования МЭМС-устройств.....	404
12.4.1.1. Моделирование в среде COMSOL.....	404
12.4.1.2. Моделирование в среде SEMulator3D	407
12.4.1.3. Особенности автоматизированного проектирования МЭМС-устройств	408
12.5. Практический пример проектирования МЭМС-устройств средствами САПР Coventor-Ware	412
Глава 13. Методологические основы организации процесса испытаний МЭМС	435
13.1. Цели и задачи испытаний микроэлектронных изделий	435
13.2. Метрологическое обеспечение – основа единства испытаний.....	437
13.2.1. Основные характеристики процесса испытаний	437
13.2.2. Общие требования обеспечения единства испытаний	438
13.2.3. Точность и воспроизводимость результатов испытаний	439
13.2.4. Требования к представлению, обработке данных, оценке точности и оформлению результатов испытаний	441
13.3. Испытательное оборудование.....	442
13.3.1. Централизованное использование испытательного оборудования	442
13.3.2. Испытательные стенды	443
13.3.3. Автоматизированные системы управления стендовыми испытаниями	445
13.3.4. Необходимость и особенности проведения аттестации испытательного оборудования.....	447
13.4. Виды и методы испытаний МЭМС-устройств.....	448
13.4.1. Основные требования к испытательной лаборатории.....	450
13.4.2. Некоторые практические аспекты калибровки МЭМС-устройств на примере акселерометра.....	451
13.5. Стандартизация метрологического обеспечения МЭМС-устройств	453

13.6. Методика разработки алгоритма программы исследования погрешностей МЭМС-акселерометров.....	458
13.6.1. Пример формулирования задачи оценки погрешности МЭМС-акселерометра	458
13.6.2. Характеристики погрешностей МЭМС-акселерометра и их классификация.....	465
13.6.3. Анализ методик исследования погрешностей МЭМС-датчиков	467
13.6.4. Статический режим испытания акселерометров	469
13.6.5. Основы методологии разработки алгоритмического обеспечения процедуры оценки погрешностей	471
13.6.6. Пример реализации программного алгоритма оценки погрешности измерений.....	474
Глава 14. Основные области применения МЭМС в автомобилях	479
14.1. Классификация и примеры датчиков автомобильных электронных систем управления и диагностического оборудования	479
14.2. Основные области применения МЭМС в автомобилях	488
14.2.1. Датчики МЭМС для систем безопасности пассажиров.....	488
14.2.2. Обнаружение опасности опрокидывания и заноса автомобиля.....	490
14.2.3. Датчики давления в шинах.....	490
14.2.4. Электронная система контроля курсовой устойчивости транспортных средств (ESC).....	491
14.2.5. Система управления динамикой автомобиля для устойчивости на поворотах (VDC)	492
14.2.6. МЭМС-датчики для электронных систем управления двигателем.....	492
14.2.7. Электронные стояночные тормозные системы	492
14.2.8. Противовогонные системы	493
14.2.9. Системы навигации автомобилей.....	493
14.2.10. Другие области применения МЭМС в автомобилях.....	493
14.2.11. Тенденции развития области применения МЭМС в автомобильной промышленности.....	494
Глава 15. Биомедицинские приложения МЭМС	497
15.1. Основные области применения МЭМС в медицинской практике.....	497
15.2. Примеры применения МЭМС в медицинской практике.....	500
15.2.1. МЭМС-устройства в хирургических инструментах.....	500
15.2.2. МЭМС для глухих людей	502
15.2.3. Медицинское обследование. Диагностика	503
15.2.4. МЭМС-устройства обработки внутрисердечных сигналов	505
15.2.5. Головная гарнитура для системы электроэнцефалограммы	506
15.2.6. Носимый модуль датчика показателей жизнедеятельности человека.....	508

15.2.7. Приборы для лечения онкологических заболеваний.....	510
15.2.8. Электронные средства доставки лекарственных средств	511
15.2.9. Профилактическая медицина	512
15.2.10. Применение МЭМС-технологий в офтальмологии	512
15.2.11. Способы передачи информации от имплантируемых медицинских МЭМС-датчиков	514
15.3. Биомедицинские микроэлектромеханические системы (биоМЭМС)	516
15.3.1. Введение	516
15.3.2. Используемые в биоМЭМС технологии и материалы.....	519
15.3.3. Микрофлюидные чипы – особенности проектирования и изготовления	521
15.3.4. Применение биоМЭМС в томографии	525
Глава 16. СВЧ-приложения МЭМС-технологий.....	529
16.1. Конструктивно-технологические особенности реализации радиочастотных МЭМС/КМОП-устройств.....	529
16.2. Радиочастотные МЭМС-переключатели	533
16.3. Радиочастотные МЭМС-конденсаторы переменной емкости.....	537
16.4. Интегрированные МЭМС/КМОП-резонаторы	539
16.5. МЭМС-технологии в задачах системной интеграции радиолокационных устройств	540
16.5.1. Типовые МЭМС-изделия для СВЧ-устройств	540
16.5.2. Две концепции системной интеграции СВЧ МЭМС-приборов.....	546
16.6. Емкостные МЭМС-переключатели СВЧ-диапазона	549
16.6.1. Основные технические характеристики СВЧ-переключателей	549
16.6.2. Стандартные МЭМС-переключатели СВЧ-диапазона	550
16.6.3. Пример типовой конструкции СВЧ МЭМС-переключателя на емкостных контактах	552
16.6.4. Оценка эффекта от включения блока DGS в структуру емкостного МЭМС-переключателя.....	554
16.6.5. СВЧ МЭМС-переключатели на основе метаматериалов	560
Глава 17. Наноэлектромеханические системы (НЭМС)	567
17.1. Введение.....	567
17.2. Технологические особенности изготовления НЭМС	571
17.3. Конструкции нанорезонаторов НЭМС-систем	578
17.4. Конструкции МЭМС-наноактюаторов.....	579
17.4.1. Электростатические наноактюаторы, использующие лазер как источник энергии.....	579
17.4.2. Диэлектрофорезный наноактюатор	580
17.4.3. Наноактюатор на эффекте поверхностного натяжения	581
17.4.4. Наноактюатор на основе нанотрубок и золотых электродов.....	582

17.5. Наносенсоры	582
17.5.1. Классификация наносенсоров	582
17.5.2. Наносенсоры на основе полевых транзисторов.....	584
17.5.3. Наносенсоры на основе нанотрубок	585
17.5.4. Наносенсоры на основе графена	586
Глава 18. Инерциальные навигационные системы на основе МЭМС-датчиков.....	591
18.1. Принципы работы и классификация инерциальных навигационных систем	591
18.2. Различия между платформенными и бесплатформенными навигационными системами	594
18.3. Основные технические характеристики МЭМС-датчиков для бесплатформенных систем навигации	597
18.4. Принципы построения бесплатформенных систем ориентации и навигации.....	599
18.5. Калибровка инерциальных чувствительных элементов	601
18.6. Информационно-управляющие системы вращающихся по крену летательных аппаратов	602
Приложение 1. Используемые термины и обозначения	607

Предисловие

Предлагаемая вниманию читателей книга ориентирована в первую очередь на студентов и преподавателей технических вузов, специализирующихся в области микроэлектроники и микросистемной техники. Кроме того, представленные здесь материалы могут быть полезны ученым, специалистам в области разработки и организации производства радиоэлектронных устройств и систем бытового, промышленного, медицинского и специального (военного и космического) назначения.

Столь широкий спектр потенциальных читателей книги обусловлен предметом исследований – микроэлектромеханическими системами (МЭМС), относительно новым направлением развития научно-технического прогресса, возникшим «на стыке» микроэлектроники и микромеханики в результате их конвергенции (объединения и взаимного проникновения).

Дело в том, что анализ современного состояния и перспектив развития техники новых поколений и «критических» технологий показывает, что одним из наиболее бурно развивающихся глобальных научно-технических направлений, определяющих новую революцию в области систем, реализуемых на микроуровне, является микросистемная техника. В рамках данного направления создаются миниатюрные чувствительные, исполнительные и энергообеспечивающие системы, в основе функционирования которых лежит активное использование классических принципов механики, оптики, акустики, электротехники, теплотехники, химии и биологии, интегрируемых в конструктивные решения на микроуровне с широким привлечением материаловедческой и технологической баз микро- и оптоэлектроники, биотехнологии. Микромашины, механизмы и приборы микросистемной техники по стоимости, надежности, ресурсу, массогабаритным показателям, энергопотреблению, широте и эффективности применения существенно превосходят традиционные аналоги.

Достаточно полное определение аббревиатуры МЭМС – это механические структуры, созданные в ограниченном объеме твердого тела и/или на его поверхности в виде сложных микросистем субмиллиметрового размера. Они представляют собой упорядоченные композиции областей материала с заданным составом, структурой и геометрией. Статическая или динамическая совокупность таких областей обеспечивает реализацию процессов генерации, преобразования и передачи энергии совместно с восприятием, обработкой, трансляцией и хранением информации. При этом выполняются запрограммированные операции и действия в требуемых условиях эксплуатации с заданными функциональными, энергетическими, временными и надежностными показателями. В дополнение к этому МОЭМС оперируют также и с оптическими системами.

По этому направлению за рубежом и в России уже написаны тысячи статей и опубликованы сотни хороших книг. Но как разобраться в этом информационном море студентам, аспирантам, молодым отечественным инженерам, выбирающим наиболее интересные и перспективные направления науки и техники для эффективного приложения своих интеллектуальных способностей, энергии и базовых теоретических знаний?

Конечно, есть Интернет, и при достаточном базовом уровне знания английского языка сегодня можно получить практически любую информацию по правильно сформулированному поисковому запросу.

Авторы сами много лет читают лекции белорусским студентам по микроэлектронной тематике и хорошо понимают остроту этой проблемы как для студентов, так и для преподавателей.

Однако наиболее оптимальным для студента решением было бы использование по возможности одного «базового» учебника по МЭМС, в котором вся эта информация была бы приведена в какую-то стройную систему и благодаря которому он может достаточно быстро понять как суть используемых принципов, физических механизмов, технологий, методов проектирования, так и конкретного применения МЭМС-устройств, состояния и тенденций их развития.

Но чтобы создать подобное энциклопедическое произведение, его авторам необходимо, во-первых, иметь необходимую мотивацию, а во-вторых – хорошо разбираться в самом предмете исследований. Руководство лидера белорусской микроэлектроники – холдинга «Интеграл» – и национальной академии наук Беларуси уделяет приоритетное внимание вопросам подготовки высококвалифицированных инженерных и научных кадров в этой области, поскольку действительно инновационный и конкурентоспособный рыночный продукт может создать только коллектив высококвалифицированных разработчиков, владеющих всем арсеналом современных знаний в области проектирования и высоких технологий. Подготовкой таких специалистов занимаются как профильные кафедры ведущих технических вузов страны, так и многочисленные филиалы этих кафедр на предприятиях отечественной полупроводниковой промышленности, преподаватели и студенты которых испытывают острый дефицит в отечественных методических, учебных и справочных пособиях по актуальным направлениям развития микроэлектроники и ее многочисленных применений.

В процессе сбора, обработки, изучения и системного анализа зарубежных и отечественных источников информации по МЭМС (монографий, статей, учебных пособий) авторами было принято решение о представлении итогового материала книги в формате «технической антологии», базируясь на текстовых и графических материалах тех работ, которые на момент подготовки рукописи получили наивысший индекс цитирования или наиболее часто использовались в учебных курсах отечественных и зарубежных технических вузов, изучающих дисциплины, непосредственно связанные с МЭМС.

В 18 тематических главах последовательно, на конкретных примерах рассмотрены все основные этапы создания МЭМС, начиная от анализа принципов работы и типовых конструкций классических датчиков силы, давления, акселерометров, гироскопов, основных технологических процессов изготовления МЭМС, методов и технологий корпусирования МЭМС-устройств, инструментов моделирования и проектирования, и заканчивая стандартами, видами и методами испытаний МЭМС-устройств.

Подробно, в объеме отдельных глав, рассмотрены особенности технологии и конструкции оптических МЭМС (ОМЭМС), наноэлектромеханических систем (НЭМС), а также основные сферы применения МЭМС – *в автомобилестроении*

(противоугонные и навигационные системы, системы безопасности, датчики давления в шинах, датчики электронных систем управления двигателями, обеспечение курсовой устойчивости, управления тормозами и т.д.), *биомедицинские приложения* МЭМС (био-МЭМС, применения в хирургии, офтальмологии, имплантируемые датчики, для обработки внутрисердечных сигналов, для систем электроэнцефалограмм, в томографии, микрофлюидные кристаллы и др.), а также *СВЧ-приложения*.

При этом авторы руководствовались следующими принципами построения материалов глав:

1. Чтобы стать достаточно популярным изданием среди широкого круга читателей (студентов и инженеров), книга должна выполнять одновременно интегральные функции и классического учебника, и краткого справочника, да и просто увлекательной книги.

2. В книге должен быть представлен достаточно объемный справочный материал, но в отличие от классических учебников с избытком формул, математических выражений, нужно было попытаться максимально простым языком изложить как основные теоретические аспекты исследуемой проблемы, так и основные методы и средства ее решения. В частности, привести конкретные практические примеры проектирования и расчета современных МЭМС-устройств.

3. В книгу должны включаться только те методы, схемотехнические и технологические решения, эффективность которых ранее была подтверждена практикой их применения.

4. В тексте книги необходимо использовать максимально возможное количество графического материала, отражающего эффективность различных конструктивно-технологических решений МЭМС-устройств.

Насколько авторам удалось в итоге реализовать эти принципы – об этом судить читателям.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю благодарность научным рецензентам – академику НАН Беларуси, иностранному избранному академику РАН В.А. Лабунову и заведующему лабораторией микро- и наносенсорики Государственного научно-производственного объединения «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» НАН Беларуси, д.т.н., профессору, лауреату премии Союзного государства России и Беларуси в области науки и техники Н.И. Мухурову, за полезные советы и критические замечания, которые в значительной степени способствовали формированию окончательного облика этой книги.

Авторы также выражают благодарность Е.Н. Карташовой, Д.В. Перепелице, Н.П. Баган и Н.Н. Венскевич за качественное выполнение большого объема работ по техническому оформлению и подготовке рукописи к сдаче в издательство.

Введение

Структура построения и последовательность представления материала направлена на изложение достаточно сложного материала в максимально упрощенном, но не в ущерб качеству, виде. Читателю последовательно излагается достаточный для понимания сути проблемы, но минимальный объем информации – от описания конструкции до анализа физических механизмов и принципов работы современных МЭМС-устройств, детализированного описания основных этапов создания – от уровня технического задания (спецификации), основных этапов и инструментов проектирования, технологических маршрутов и технологических операций их изготовления, измерений и испытаний до примеров практических применений МЭМС-устройств в автомобильной, авиационной, медицинской, промышленной и бытовой технике.

Глава 1 представляет собой краткое иллюстрированное введение в тематику МЭМС. Вначале здесь приводятся основные вехи из истории развития этого направления, начиная с середины 50-х годов прошлого века до настоящего времени. Затем излагаются основные понятия, термины и определения из области МЭМС, их классификация по различным признакам, рассматриваются основные типы и конструкции различных современных МЭМС-устройств. Здесь изложение материала построено следующим образом. На ряде конкретных иллюстрированных примеров продемонстрированы основные принципы, функции, особенности применения различных типов МЭМС-устройств в конкретных приложениях.

Например – изображен общий вид материнской платы современного мобильного телефона, на которой показаны реальные компоненты, изготовленные на основе МЭМС-технологий – инерционные (INS MEMS), радиочастотные (RF MEMS), оптические (MO MEMS), энергетические (Power MEMS) и даже биомедицинские (Bio MEMS).

Для автомобильных применений – показаны местоположение, название и функции автомобильных МЭМС-устройств, а также внешний вид и типовые конструкции наиболее часто используемых автомобильных датчиков. В качестве типового примера применения в системах вооружений и военной техники демонстрируются конструкции различных МЭМС-взрывателей.

Здесь также приведены характерные иллюстрированные примеры применения СВЧ-МЭМС в радиолокации (фазированная антенная решетка ФАР), в микрофлюидике (биофильтры с иммуносенсором), в качестве источников питания (МЭМС-аккумуляторы) и многое другое.

Глава 2 посвящена прежде всего изучению «азов» классической микросистемной техники, исторической предшественницы МЭМС, на примере изучения конструкций и принципов работы наиболее широко используемых в промышленности датчиков силы, крутящего момента. Эволюция МЭМС-технологий позволила существенно улучшить технико-экономические параметры всех этих приборов, хотя принципы и механизмы их работы остались прежними.

Так, во второй части главы уже более детально рассмотрены конструкции и принципы работы тензодатчиков, резонансных и ПАВ-датчиков, емкостных и оптических микродатчиков, тактильных и магнитных датчиков, атомно-силовых

микроскопов и сканирующих зондов, реализованных на основе МЭМС-технологий.

Глава 3 посвящена изучению датчиков давления, причем здесь также в первой части рассматриваются классические приборы — микромеханические датчики давления.

Здесь дано определение всем важнейшим техническим характеристикам датчиков давления — гистерезис, линейность, чувствительность, долгосрочный дрейф, температурный дрейф и др. Конкретно рассматриваются микромеханические датчики абсолютного давления, вакуумные и мембранные датчики.

Вторая часть главы уже вплотную подходит к изучению датчиков давления, изготовленных на основе МЭМС-технологий (пьезоэлектрические, емкостные, резонансные, МЭМС-микрофоны).

Отдельный раздел главы (3.7) посвящен изучению конструктивных особенностей МЭМС-датчиков давления (классификация, конструкции, физические механизмы, расчетные формулы и т.п.). Изложение материала иллюстрируется конкретными примерами конструктивных решений МЭМС-датчиков.

Глава 4 посвящена изучению МЭМС-актюаторов — специальных устройств, которые преобразуют получаемую извне энергию в управляемое механическое воздействие или передачу тепла или светового излучения. Приведена классификация различных типов актюаторов и детально рассмотрены принципы работы, конструкции, особенности проектирования и расчета электростатических, магнитных, пьезоэлектрических, гидравлических (микрофлюидных) и тепловых актюаторов.

В главе 5 вначале рассмотрены принципы действия, конструкции и методы расчета микромеханических микродвигателей (гребенчатых, зубчатых, роторных), а также устройств фиксации, микрорычагов, микроблокираторов.

Вторая часть главы посвящена изучению самостоятельного типа специализированных МЭМС-транспортеров и МЭМС-турбин — их конструктивных решений, физических механизмов и принципов работы, а также приводов для оптических затворов.

Глава 6 полностью посвящена изучению МЭМС-акселерометров, которые широко используются в качестве датчиков ускорения в системах стабилизации, навигации, безопасности авто- и электромобилей и других транспортных средств, а также в аэрокосмической и военной технике, высокоточных системах вооружений. Приведены их классификация и основные определения, рассмотрены наиболее широко используемые конструктивно-технологические решения и принципы их работы. В частности, по виду движения инерционной массы акселерометры бывают либо осевыми, либо маятниковыми, по виду измерения ускорения — линейные и угловые, по принципу измерения — прямого и комбинационного типа.

Особое внимание уделено анализу конструкций и принципов работы чувствительных элементов (ЧЭ) современных акселерометров.

Особую практическую ценность здесь представляет раздел, посвященный особенностям организации измерительных цепей дифференциальных и компенсационных датчиков ускорения — эта тема обычно является проблемной для большинства студентов при подготовке соответствующих курсовых и дипломных проектов.

Завершает главу конкретный пример разработки электрической схемы дифференциального емкостного параметрического преобразователя, позволяющего устранить (уменьшить) влияние неинформативных составляющих входящего сигнала датчика с использованием методов временного разделения каналов.

Глава 7 посвящена изучению МЭМС-гироскопов – устройств, в которых энергия вынужденных (первичных) колебаний инерционной массы на упругом подвесе (резонаторе) при появлении угловой скорости преобразуется в энергию вторичных колебаний, которые содержат информацию об измеряемой текущей угловой скорости.

Приведена их классификация, анализ конструкций и принципов работы гироскопов LL-типа (поступательные перемещения), RR-типа (вращательные) и LR-типа (комбинированные перемещения).

В отдельных разделах главы рассмотрены также многоосевые, камертонные, волновые микрогироскопы, а также особенности работы МЭМС-гироскопа с вибрирующим кремниевым кольцом.

Глава 8 посвящена изучению современных МЭМС-устройств генерирования и аккумуляции энергии, которые предназначены для замены обычно используемой системы питания от энергосетей беспроводных МЭМС-датчиков. Этот сравнительно новый класс МЭМС-устройств получил название «инновационные приборы аккумуляции энергии» и включает в себя механические и термические устройства аккумуляции и генерирования энергии.

Здесь детально рассмотрены конструкции и принципы работы пьезоэлектрических (наногенераторы, МЭМС-аккумуляторы) и электростатических приборов аккумуляции энергии.

В главе 9 достаточно подробно рассмотрены базовые технологические процессы изготовления различных типов МЭМС-устройств, а именно – технологические маршруты объемной и поверхностной микрообработки кремниевых структур, полимерных МЭМС-устройств, 3D-микротехнологии, технологии соединений кремниевых пластин с МЭМС-устройствами (сварка плавлением, анодное соединение кремния со стеклом, эвтектическое соединение, вакуумная сварка, клеевые соединения, гальваника).

В рамках отдельных разделов здесь детально рассмотрены особенности реализации наиболее массового вида технологии изготовления МЭМС-устройств – техпроцесс LIGA, а также наиболее часто используемых в промышленности технологических методов осаждения различных материалов, используемых при изготовлении МЭМС-устройств (термическое выращивание, химическое осаждение из паровой фазы, поликристаллического и аморфного кремния, нитрида кремния, диоксида кремния).

Рассмотрены также важные для практического использования технологические особенности реализации ключевых процессов фотолитографии МЭМС-устройств (двусторонняя литография, взрывная, литография в оттенках серого цвета, толстые и ламинированные фоторезисты).

Завершает главу раздел, посвященный описанию современных технологий травления МЭМС-структур, где рассмотрены тонкости мокрого изотропного травления

кремния, мокрого анизотропного, а также сухого изотропного и анизотропного процессов травления.

В главе 10 рассмотрены конструкции и технологические маршруты изготовления оптических МЭМС (МОЭМС) и их области применения, в том числе в различных дисплейных устройствах (пикопроекторы, микродисплеи). Это самостоятельное и стремительно развивающееся направление МЭМС включает в себя изготовленные с использованием специальных технологий как оптические компоненты или целые оптоэлектронные устройства и системы, так и отдельные волноводы, дифракционные решетки, подвижные микрозеркала и другие элементы, которые могут изменять, модулировать путь светового луча или даже спектрально модифицировать световой луч.

В частности, рассмотрены конструкции и технологии наиболее известных мировых лидеров в этой области – Qualcomm, DLP, 3D Ready, Brilliant Color, GLV и др.

Завершает главу раздел, посвященный особенностям применения МОЭМС в устройствах визуализации (портативных камер) для различных 3D-приложений, в том числе для распознавания и классификации различных физических объектов и медицинских приложений (3D-эндоскопия).

Глава 11 посвящена изучению методов и технологий корпусирования (сборки) МЭМС-устройств, поскольку для абсолютного большинства МЭМС требуется использовать особую, отличную от стандартной технологию корпусирования микросхем, обеспечивающую надежную защиту МЭМС-структур.

Здесь рассматриваются наиболее часто используемые в промышленном производстве методы корпусирования: на уровне кристаллов (капсулирование, пайка стекло-керамическим припоем, объемная поверхностная обработка); на уровне пластины (методом WLP, тонкопленочное корпусирование, герметизация лазерным оплавлением, объемная микрообработка, с применением термопластичных материалов, методом электрохимического осаждения, 3D-сборка), а также сборка с использованием технологии так называемой вакуум-плотной герметизации и вакуумирования.

Глава 12 посвящена изучению основ проектирования МЭМС-устройств – одному из самых ответственных этапов процесса создания приборов этого типа.

Здесь рассмотрены наиболее часто используемые разработчиками инструменты и средства проектирования МЭМС-устройств (CovertorWare, Matlab, Simulink, MEMS+ и др.), для более глубокого освоения этого предмета здесь же приводится конкретный пример проектирования простейшей МЭМС-конструкции, представляющей собой балку, опирающуюся концами на кремниевую пластину.

При написании этой главы, кроме авторских разработок, были использованы текстовые и графические материалы из соответствующих учебно-методических пособий ведущих отечественных и зарубежных технических вузов, получивших наибольшую популярность в среде студентов, изучавших это «искусство и науку» проектирования МЭМС.

Глава 13 посвящена описанию методов, технологий и оборудования, используемых при проведении испытаний изготовленных на производственных линиях МЭМС-устройств. Здесь даны основные термины и определения, относящиеся к методологическому обеспечению процесса испытаний (точность, воспроизво-

димось, единство измерений), даны комментарии по наиболее часто используемым стандартам. Описана типовая методика разработки алгоритма программы исследования погрешностей МЭМС-устройств, особенности реализации которой продемонстрированы на конкретном примере построения программного алгоритма оценки погрешности конкретного МЭМС-акселерометра.

В главе 14 рассмотрены основные области применения МЭМС-устройств в автомобилях. Здесь приведена классификация и примеры датчиков, встраиваемых в бортовые электронные системы управления, безопасности и диагностики: датчики массового расхода воздуха, положения коленчатого вала, положения дроссельной заслонки, регулятора холостого хода двигателя, температуры охлаждающей жидкости, лямбда-зонд и др.

Глава 15 посвящена биомедицинским приложениям МЭМС, в первую очередь в медицинской практике: для контроля состояния пациента в режиме реального времени, уход за больными, диагностическая визуализация, in-vitro-диагностика и доставка лекарственных средств посредством так называемой «лаборатории на кристалле».

Рассмотрены конкретные примеры применения МЭМС-устройств в хирургических инструментах, для обработки внутрисердечных сигналов и электроэнцефалограмм, в офтальмологии, для людей, имеющих проблемы со слухом, для целей профилактики и диагностики. Особое внимание уделено рассмотрению способов надежной передачи информации от имплантируемых медицинских МЭМС-датчиков.

Завершает главу рассмотрение особенностей применения био-МЭМС (используемые технологии и специальные материалы, микрофлюидные чипы, применение в томографии и др.).

В главе 16 рассмотрены основные направления использования МЭМС-устройств в СВЧ-приложениях.

Дело в том, что при создании современных высокочастотных и СВЧ-приборов и систем используются многочисленные реконфигурируемые радиочастотные входные блоки и модули, которые должны работать с самыми разнообразными протоколами обмена. В таких блоках необходимо применять как различные переключаемые МЭМС-переключатели, так и специализированные модули, которые должны быть малогабаритными, малопотребляющими, иметь низкие потери и большой диапазон перестройки частоты. Выполнять эти требования КМОП-технологии уже не могут, поэтому разработчики СВЧ-систем уже более 10 лет используют так называемые «реконфигурируемые» МЭМС-устройства, работающие под управлением стандартных КМОП-микросхем.

Здесь рассмотрены конструктивно-технологические особенности радиочастотных МЭМС-переключателей, МЭМС-конденсаторов переменной емкости, МЭМС/КМОП-резонаторов, а также различные МЭМС-переключатели СВЧ-диапазона.

Следует отметить, что здесь представлены в основном МЭМС-устройства, которые были разработаны более 10 лет назад, а на момент выхода этой книги на рынке присутствуют множество существенно усовершенствованных, намного более сложных изделий этого класса, которые широко используются разработчи-

ками современной радиоэлектронной аппаратуры. Изучение принципов работы представленных здесь изделий позволит студенту – будущему инженеру, легче разобраться с этими достаточно сложными современными МЭМС-устройствами, поскольку в целом основные способы их конструирования и применения остались практически неизменными.

В главе 17 очень кратко рассмотрены особенности нано-электромеханических систем (НЭМС) – еще одного из многочисленных направлений развития МЭМС-технологий.

Наноэлектроника – это область науки и техники, где многочисленные команды исследователей во всем мире занимаются созданием, исследованием и применением электронных приборов с нанометровыми размерами базовых элементов, в основе функционирования которых лежат квантово-механические эффекты.

Образно говоря, НЭМС представляет собой класс новых устройств, объединяющих «электрическую» и «механическую» функциональность на наноуровне, образуя следующий логический шаг процесса миниатюризации МЭМС, которые интегрируют «транзистороподобную наноэлектронику» с механическими приводами, насосами или двигателями, и в конечном итоге позволяет создавать физические, биологические и химические датчики.

В первой части главы рассмотрена эволюция НЭМС и технологии их изготовления (формирование нанонитей, элеткротспиннинг, биологические и самособирающиеся материалы), вторая часть посвящена изучению конструкций наиболее известных НЭМС-устройств (нанорезонаторов, наноактюаторов и наносенсоров).

Глава 18 является завершающей и посвящена описанию одного из важнейших конкретных применений технологий МЭМС – применению МЭМС-датчиков в навигационных системах. Приведены основные технические характеристики, принципы работы и примеры применения МЭМС-датчиков при создании современных платформенных инерциальных навигационных систем (ПИНС) геометрического, аналитического и полуаналитического типов.

Здесь также рассмотрен ряд важных для практического использования вопросов – особенности калибровки инерциальных чувствительных элементов навигационных МЭМС-датчиков; особенности построения информационно-управляющих систем «вращающихся по крену» летательных аппаратов, и многое другое.

ГЛАВА I

ИЛЛЮСТРИРОВАННОЕ ВВЕДЕНИЕ В ПРОБЛЕМУ МЭМС

1.1. Краткая история развития МЭМС

В истории развития MEMS-технологий эксперты выделяют пять пройденных этапов. На *первом исследовательском этапе* (с середины 50-х до начала 60-х годов прошлого столетия) основные усилия к формированию облика будущей технологии приложили как научные подразделения крупных полупроводниковых компаний (в первую очередь знаменитая Bell Laboratories), так и академическая и университетская наука. Специфика этого периода заключалась в том, что главное внимание уделялось востребованным во времена холодной войны технологиям «двойного» назначения, прежде всего – созданию точных и дешевых датчиков различных физических величин.

Второй этап развития МЭМС-технологии эксперты также связывают исключительно с такими мощными военно-промышленными компаниями, как Fairchild, Westinghouse, Honeywell, которые спешили коммерциализировать первые научные и экспериментальные наработки. На коммерциализацию ушло довольно много времени, и только к началу 70-х годов на *третьем этапе* – академическая и университетская наука стала получать целевое финансирование от промышленности для решения задач сокращения стоимости и расширения областей применения MEMS-устройств.

Еще примерно через десять лет этот третий этап также был преодолен – и наступил *четвертый этап* – массового промышленного производства различных МЭМС-устройств. Можно считать, что с конца 90-х годов прошлого века началась «микроэлектромеханическая» эпоха. Многие эксперты, включая и отечественных специалистов, полагают, что MEMS-технология приносит буквально революционные изменения в каждую область применения путем совмещения микроэлектроники на основе кремния с микромеханической технологией, что позволяет реализовать систему на одном кристалле SoC (Systems-on-a-Chip). Сегодня МЭМС-технология вступила в *пятый этап* своего стремительного развития. Так, технология MEMS дала новый импульс развитию систем инерциальной навигации и интегрированных систем, открыв путь к разработке «умных» изделий, увеличив вычислительные способности микродатчиков и расширив возможности дизайна таких систем.

Сегодня MEMS-устройства применяются практически повсюду. Это могут быть миниатюрные детали (гидравлические и пневмоклапаны, струйные сопла принтера, пружины для подвески головки винчестера), микроинструменты (скальпели и пинцеты для работы с объектами микронных размеров), микромашины (моторы, насосы, турбины величиной с горошину), микророботы, микродатчики и испол-

нительные устройства, аналитические медицинские и биологические микролаборатории (на одном кристалле) и многое другое.

Ниже кратко рассмотрим наиболее значительные события из истории развития МЭМС-технологий [1–3].

Так, в 1947 году Уильям Шокли, Джон Бардин и Уолтер Брэтэйн из Bell Laboratories создали первый транзистор, для изготовления которого использовался наиболее изученный на тот момент полупроводниковый химический элемент германий.

В 1954 году К.С. Смит открыл пьезорезисторный эффект в таких полупроводниках как германий и кремний, причем этот пьезорезисторный эффект в полупроводниках, выражался в несколько раз сильнее, чем в металлах. Это открытие было очень важно для возникновения такого направления, как MEMS, поскольку германий и кремний могли лучше других элементов улавливать и преобразовывать изменение давления жидкости или воздуха и оказались наиболее пригодными для конструирования на их основе различных датчиков физических величин.

Практическим результатом открытия пьезорезисторного эффекта в полупроводниках явилось начало промышленного производства серии различных *датчиков давления* на основе кремния. В 1959 году компания Kulite стала первой в мире по объему производства таких датчиков для коммерческих применений.

Однако в технологии изготовления таких датчиков каждый транзистор должен был подсоединяться электрическими проводниками к элементам другой электроники, поэтому существовало определенное ограничение на геометрические размеры транзистора. Необходимо было придумать новое революционное техническое решение, способное уместить в себе транзисторы, резисторы, емкости и соединительные провода.

Так получилось, что два человека, почти одновременно и независимо друг от друга, разработали первую интегральную схему. В 1958 году Джек Килби, работающий в Texas Instruments, создал первую «твердую схему». Это схема состояла из транзистора, трех резисторов и одной емкости, размещенных на кристалле германия. Немного позже Роберт Нойз из Fairchild Semiconductor создал свою первую так называемую интегральную схему. Эта интегральная схема была изготовлена на кристалле кремния и запатентована в 1961 году.

В 1964 году компания «Вестингауз» под руководством Харви Натансона выпустила первую серийную MEMS. Это устройство объединяло в себе механические и электронные компоненты и называлось *резонансным затворным транзистором*. Его длина составляла около одного миллиметра. Этот элемент был чувствителен к широкому диапазону численных значений входного электрического сигнала. Он работал как классический частотный фильтр, т.е. пропускал сигналы только определенного частотного диапазона.

В 1971 году компания Intel представила общественности свой первый микропроцессор — Intel 4004. Это изобретение дало дорогу развитию семейства персональных компьютеров. Как упоминалось выше, MEMS используют полупроводниковую технологию изготовления, а в начале 60-х годов в производстве кремниевых транзисторов впервые стали использовать *изотропное травление кремния*. При изотропном травлении материал удалялся с подложки при помощи химических реакций. Материал одинаково удалялся во всех направлениях, т.к. скорость травления была одинаковой.

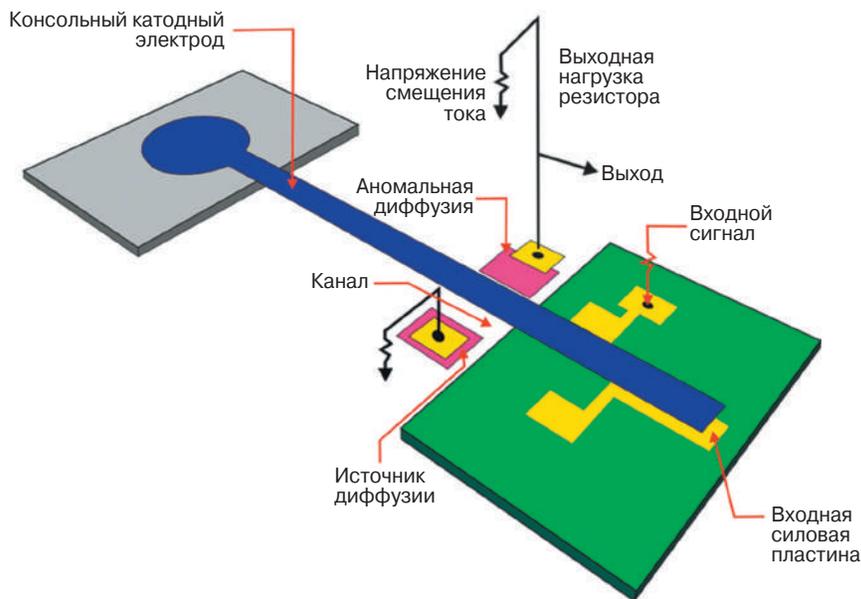


Рис. 1.1. Резонансный затворный транзистор

В конце 60-х – начале 70-х годов была опубликована известная специалистам статья Х.А. Ваггенера под названием «Электромеханически контролируемое прореживание кремния». В этой статье описывалась технология *анизотропного влажного травления* кремния. Влажное анизотропное травление отличалось от изотропного тем, что электромеханическое удаление материала зависело от кристаллографической ориентации используемого кристалла кремния. Скорость травления (т.е. количество удаляемого материала в единицу времени) значительно отличалась для различных плоскостей кристалла. Теперь становилось возможным при изготовлении МЭМС-устройств использовать *выборочное травление* пластины кремния, что давало возможность создавать такие структуры, как V-образные желоба, пирамиды, микрокамеры. Электромеханическое анизотропное травление оказалось очень важно для производства микросистем, т.к. является технологической основой для *объемной микрообработки*. Объемная микрообработка удаляет только относительно большие части кремниевой подложки, оставляя необходимые конструктору МЭМС-структуры.

Начиная с момента изобретения, технология объемной микрообработки остается до сих пор очень мощным инструментом производства таких микромеханических элементов, как микроканалы, распылители, диафрагмы, подвесные балки и другие подвижные и структурные конструкции.

В 1970-х годах Куртом Петерсоном из исследовательской лаборатории ИВМ был разработан фактически первый в мире микромеханический датчик давления. Здесь тонкая диафрагма могла очень сильно изгибаться, что давало ощутимое превосходство перед существующими датчиками мембранного типа того времени. Датчик давления с тонкой диафрагмой нашел широкое применение прежде всего в устройствах мониторинга кровяного давления. Можно считать, что это было первое коммерческое применение MEMS.

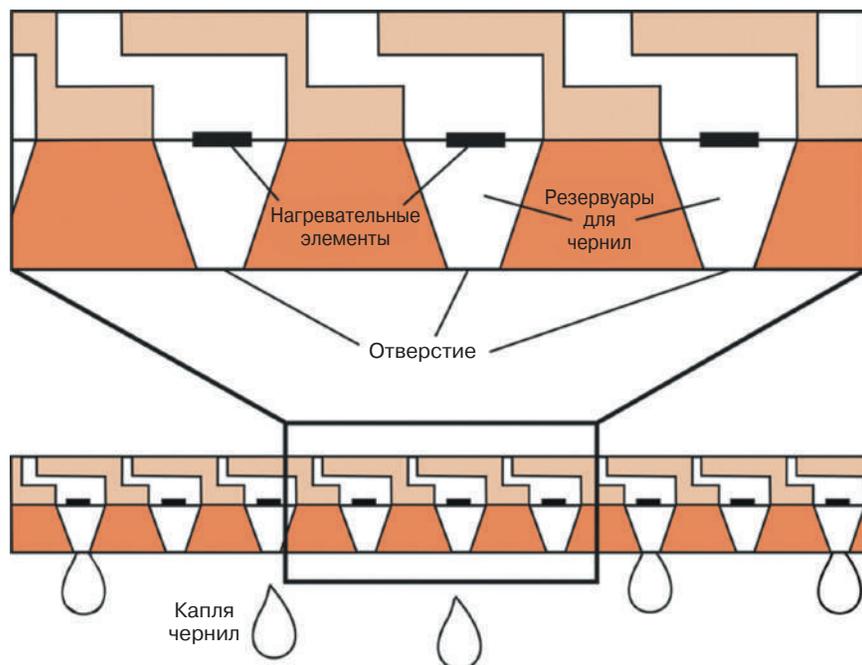


Рис. 1.2. Эскиз конструкции микрораспылителей чернил

В 1979 году специалисты компании Hewlett Packard создали технологию термографических чернил как альтернативу технологии растровых матриц. Эта технология печати быстро нагревала чернила, образуя тонкие пузырьки. Когда пузырьки лопались, их капельки струились через распылители. Массив таких распылителей (рис. 1.2) был частью головки принтера и позволял быстро печатать изображения на бумаге. Технология микрообработки кремния до сих пор иногда используется для создания таких распылителей, поскольку такие распылители имели очень «маленькие» геометрические размеры и большую плотность упаковки.

Наконец, в начале 1980-х годов немецкая компания Karlsruhe Nuclear Research Center разработала *новый метод микрообработки, названный LIGA*.

Название технологии LIGA происходит от немецкой аббревиатуры Roentgen Lithography Galvanik Abformung, что означает комбинацию рентгеновской литографии, гальванотехники и прессовки (формовки). Здесь толстый фоторезистивный слой подвергается воздействию рентгеновских лучей (засветке) с последующим гальваническим осаждением высокопрофильных трехмерных структур.

Сущность технологического процесса заключается в использовании рентгеновского излучения от синхротрона для получения глубоких, с отвесными стенками топологических картин в полимерном материале. Как известно, излучение синхротрона имеет сверхмалый угол расходимости пучка. Обычно источником излучения служат высокоэнергетические электроны (с энергией более 1 ГэВ), движущиеся с релятивистскими скоростями. Глубина проникновения излучения достигает нескольких миллиметров, что обуславливает высокую эффективность экспонирования при малых временных затратах.

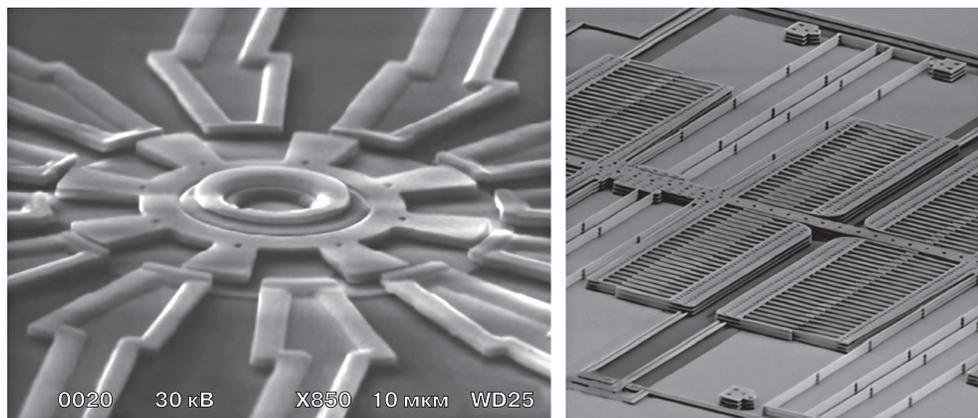


Рис. 1.3. Общий вид электростатического двигателя (слева) и привода с боковыми ресничками (справа)

Считается, что данная технология обеспечивает наилучшее отношение воспроизводимой ширины канала к его длине при минимальных геометрических размерах.

Много новых изобретений появилось в конце 80-х годов. Так, в 1988 году в институте Беркли был создан первый электростатический двигатель, а в 1989 году был создан первый привод с боковыми ресничками (рис. 1.3).

В 1993 году Центр микроэлектроники Северной Каролины построил свою первую фабрику по производству МЭМС-устройств, что давало возможность сделать MEMS доступными уже более широкому кругу потребителей. Этот процесс микрообработки носил название *MUMPs (MultiUser MEMS Processes)*.

В 1998 году уже другая фабрика по производству MEMS начала свою работу. Она была основана на базе лабораторий Sandia National и использовала еще один запатентованный процесс SUMMiT IV, затем перейдя на SUMMiT V (рис. 1.4).

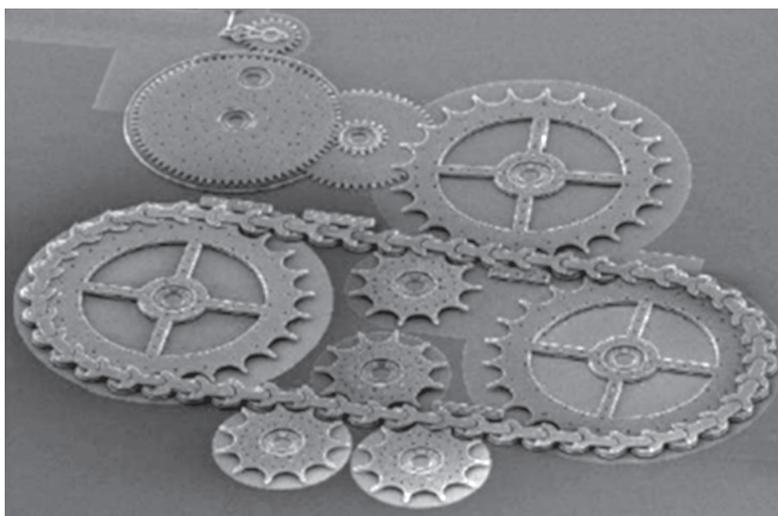


Рис. 1.4. Общий вид первых MEMS, созданных с использованием процесса SUMMiTV

В этом же 1993 году компания Analog Devices стала первой, кто начал выпускать *MEMS акселерометры* в большом количестве. Как будет показано ниже, эти акселерометры затем нашли широкое применение в автомобильной промышленности, поскольку они были недорогими и очень надежными. Поэтому до сих пор акселерометры используются в различных областях промышленности, таких как автономные системы навигации, в игровых контроллерах, мобильных и компьютерных системах.

В 1994 году компания Bosch разработала и внедрила в серийное производство технологию глубокого реактивного ионного травления, которая была изначально предназначена для создания микросхем динамической памяти произвольного доступа.

В 1999 году еще одна полупроводниковая компания Lucent Technologies выпустила на рынок первый *MEMS-переключатель для оптических сетей*. Оптические переключатели – это оптоэлектрические устройства, состоящие из источника света и детектора, которые использовали МЭМС-микрзеркала, чтобы быстро переключать или отражать оптический канал от одного места к другому в зависимости от угла наклона зеркал. Существует множество запатентованных конструкций таких переключателей, которые совершенствуются и сегодня.

Краткая история развития МЭМС за период до 2000 г. может быть представлена в виде табл. 1.1.

Таблица 1.1. Основные вехи истории развития МЭМС-технологий до 2000 г.

Годы	События
1958	Кремниевые, коммерчески доступные средства измерений
1959	«В основании много места», – заявил Ричард Фейнман в Калифорнийском институте технологии и предложил 1000 долл. США тому, кто создаст электрический двигатель, меньший, чем 1/64 дюйма
1961	Демонстрируется первый кремниевый датчик давления
1967	Изобретение поверхностной микромеханической обработки. Фирма Westinghouse создает резонансный полевой вентильный транзистор. Описание материала, освобождающего микро-механические устройства от кремниевой подложки
1970	Демонстрируется первый кремниевый акселерометр
1979	Первое микромеханическое струйное сопло
1982	Одноразовый преобразователь кровяного давления
1982	Кремний как механический материал – первая публикация
1982	Процесс LIGA
1988	Первая МЭМС-конференция
1992	Представляется Многопользовательский процесс МЭМС (MUMPS), спонсируемый Управлением перспективных исследовательских программ (DARPA)
1992	Первый микромеханический шарнир
1993	Продан первый акселерометр, выполненный с использованием поверхностной микромеханической технологии (Analog Devices, ADXL50)
1994	Запатентовано глубокое реактивное ионное травление (ГРИТ)
1995	Коммерческое использование микрогирископов. Активно развиваются БиоМЭМС
2000	Оптические МЭМС становятся коммерческим продуктом. <ul style="list-style-type: none"> • поверхностная микромеханическая обработка; • микромеханическая обработка высокоформатного изображения (HARM), которая включает технологию типа LIGA (немецкая аббревиатура от Lithographie, Galvanoformung, Abformung); • MUMPS-процесс

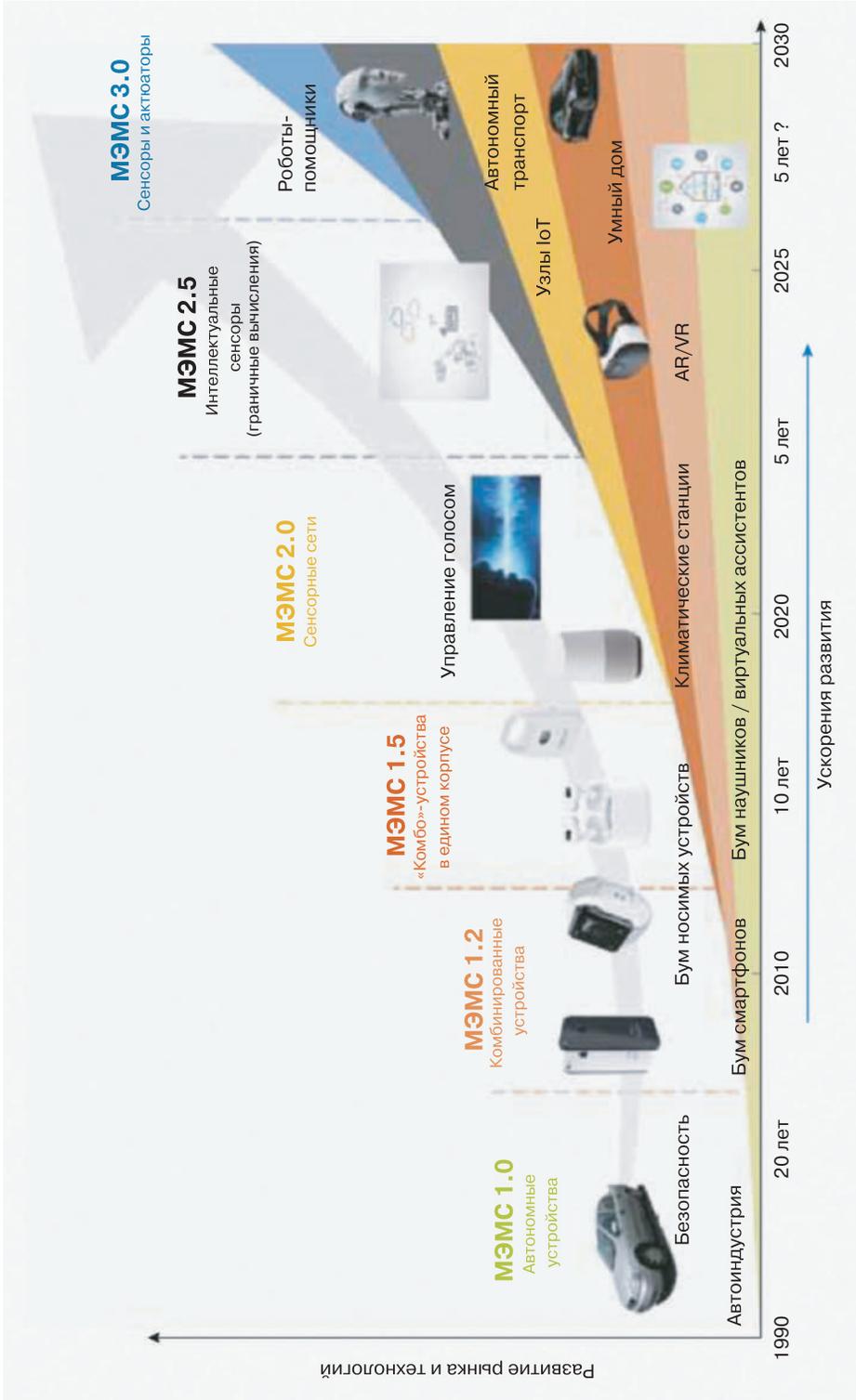


Рис. 1.5. Этапы эволюции промышленно выпускаемых МЭМС-устройств

На рис. 1.5 [4] в упрощенном графическом виде представлен ход эволюции конструкций MEMS-устройств за период с 1990 г. и прогноз развития этого направления на период до 2030 г.

Как видно, эволюция МЭМС-устройств продолжает развиваться, от конструкций типа «одно устройство — одна функция» происходит переход к сложным комбинированным устройствам, объединяющим в единой конструкции преобразовательные и исполнительные элементы разных типов, а также микропроцессоры. В микросистемах, в особенности для Интернета вещей, начинают применять искусственный интеллект и машинное обучение.

В XXI веке, начиная с 2000 г., наблюдался лавинообразный рост различных новых конструктивных, технологических и системотехнических решений МЭМС-устройств, в ходе развития которого трудно выделить какие-то отдельные этапы, поэтому наиболее значимые достижения этого периода в иллюстрированном виде перечислены в следующем разделе этой главы.

1.2. Основные типы и конструкции МЭМС-устройств

В общем случае под термином «микросистема» сегодня понимают некоторую интеллектуальную миниатюризированную техническую систему, обладающую сенсорными, процессорными или механическими актюаторными функциями, в которой используется комбинация двух или более разных устройств, функционирующую на основе использования электрических, механических, оптических, химических, биологических, магнитных или других устройств, интегрированных на одном полупроводниковом кристалле или мультичиповой плате (рис. 1.6).

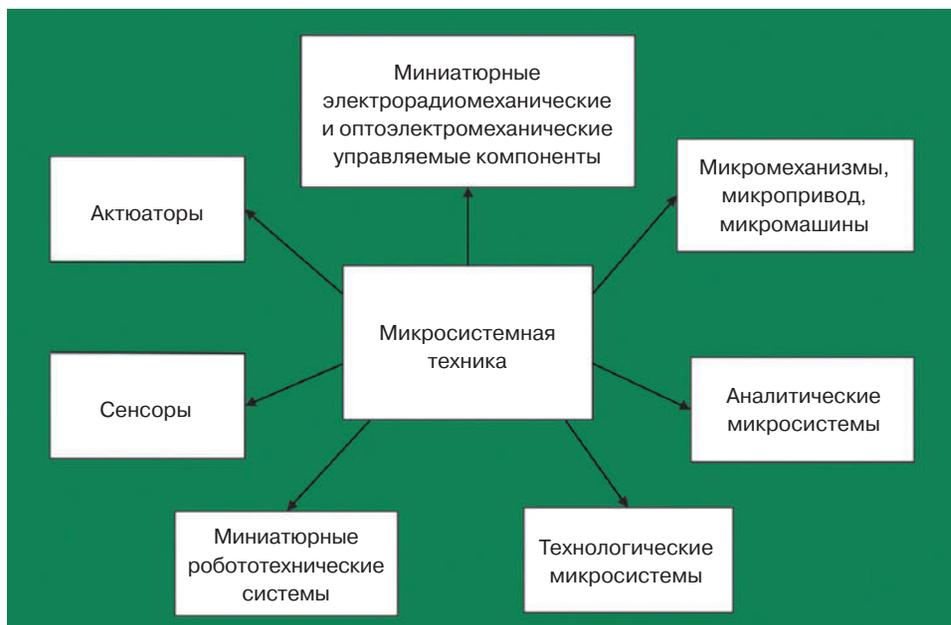


Рис. 1.6. Структура направления «микросистемная техника»

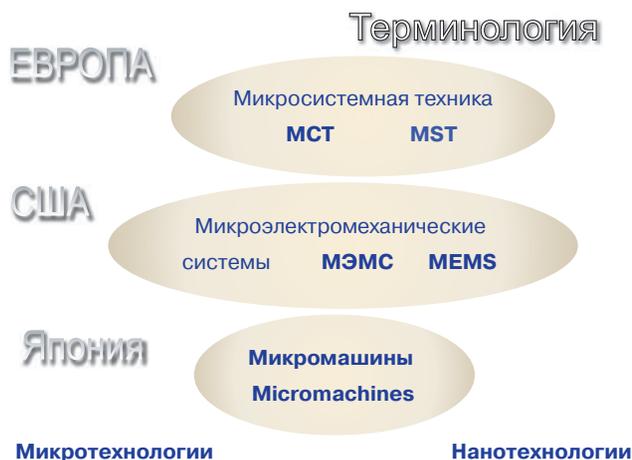


Рис. 1.7. Терминология МЭМС-устройств

Следует отметить, что для обозначения этого направления в различных странах часто используются и другие термины (рис. 1.7). Так, в Европе раньше обычно использовали термин *Microsystems technology* (MST) — «микросистемная технология», в Японии чаще используют термин «мехатроника» и «микромашины», а в США и Англии предпочитают использовать термин «микроэлектромеханические системы» (МЭМС).

Здесь и далее применяется следующее определение: *МЭМС* — это интегрированные микроустройства или системы, сочетающие в себе электрические и механические компоненты, изготовленные по технологиям, совместимым с технологией изготовления микросхем, и имеющие размеры от единиц микрометров до десятков миллиметров. Ниже в тексте книги мы будем использовать только этот термин.

Конструктивно современные МЭМС-устройства представляют собой интегральные устройства, выполненные на полупроводниковой подложке и включающие в себя *чувствительный элемент* (сенсор) и *актюатор* (преобразователь), а также электронную схему обработки электрических сигналов, систему хранения и передачи информации (рис. 1.8).

Часто также используется термин *сенсор* — это измерительное устройство, которое преобразует то или иное физическое воздействие в электрический сигнал. К сенсорам относятся акселерометры, гироскопы, магнетометры; датчики давления, расходомеры и т.д.

Актюатор представляет собой исполнительное устройство, преобразующее один вид энергии (электрическую, магнитную, тепловую, химическую) в другой (обычно — в механическую). Это могут быть различные устройства перемещения или поворота, гидравлические и пневматические клапаны, реле, струйные сопла, моторы, насосы, зеркала турбины и т.д., которые в названии содержат приставку «микро».

Большинство МЭМС изготавливаются с помощью стандартных технологий производства интегральных микросхем, которые включают в себя технологические операции осаждения тонкопленочных слоев, литографии, травления и т.д. (рис. 1.9).



Рис. 1.8. Взаимосвязь областей микроэлектроники, микротехнологий и микро-системной техники



Рис. 1.9. Синергия микроэлектроники и микротехнологии

Для формирования механических и электромеханических элементов МЭМС используются технологические процессы микрообработки, позволяющие селективно вытравливать отдельные элементы кремниевой подложки или добавлять новые структурные слои. Совмещая в себе классические базовые элементы полупроводниковой микроэлектроники и различные механические элементы, созданные микрообработкой, в подобных микроэлектромеханических системах к функциональным возможностям микроконтроллеров и процессоров добавляются возможности «восприятия» окружающей физической среды с помощью интегрированных микро-сенсоров и воздействия на нее с помощью микроактуаторов. Образно говоря, в такой системе стандартная интегральная микросхема выполняет роль ее «мозга», а МЭМС предоставляет ее «уши», «глаза» и «руки», позволяя системе распознавать, контролировать и управлять параметрами окружающей физической среды.

«Микрообразные» современные микросенсоры и системы на их основе способны собирать информацию об окружающей среде, измеряя различные механические, термические, биологические, химические, оптические и магнитные параметры. Микроконтроллеры затем обрабатывают полученную информацию и, в соответствии с заданным алгоритмом, производят с помощью микроактуаторов соответствующие действия, например, управляют движением, позиционированием, стабилизацией, фильтрацией и т.д. Поэтому МЭМС-устройства позволяют реализовывать на полупроводниковом кристалле системы с высоким уровнем сложности, функциональности и надежности.

Типичные размеры микромеханических элементов (компонент системы) лежат в диапазоне от 1 до 100 мкм, тогда как размеры кристалла МЭМС-микросхемы достигают величин от 20 мкм до 1 мм (рис. 1.10). В качестве конкретного примера на рис. 1.11 [3] показаны различные конструкции зубчатых элементов гребенчатых МЭМС-микродвигателей.

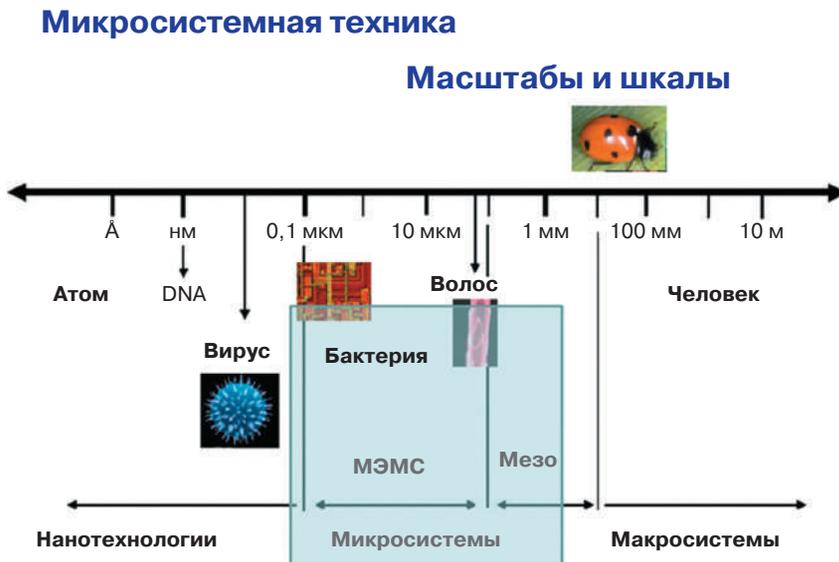


Рис. 1.10. Масштабы и шкалы микромира МЭМС



Рис. 1.11. Типовые конструкции зубчатых элементов гребенчатых микродвигателей МЭМС

ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ для аэродинамических исследований

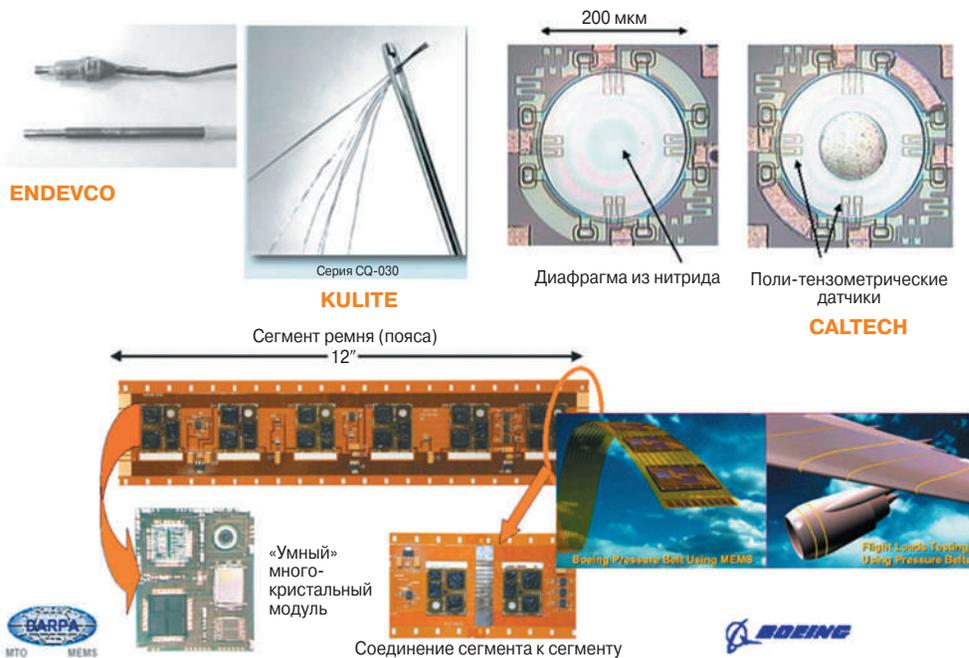


Рис. 1.12. Общий вид датчиков давления, используемых компанией «Боинг» для аэродинамических исследований

В последнее десятилетие активно развивается и *наноэлектромеханические системы (НЭМС)*, которые представляют собой интегральные устройства, объединяющие в себе электронные и механические компоненты размером до 100 нм. В настоящее время наноэлектромеханические системы могут изготавливаться как методами «сверху вниз», к которым относятся традиционные методы микроэлектроники (оптическая, рентгеновская и электронно-лучевая литографии), так и методами «снизу вверх», такими как молекулярное распознавание и самосборка.

На основе МЭМС-технологий в настоящее время в серийном производстве выпускаются такие устройства, как акселерометры, гироскопы, микромоторы и микрозахваты.

Все многообразие современных МЭМС-устройств можно классифицировать на три большие группы в зависимости от их функционального назначения, архитектуры и используемых физических механизмов работы.

Так, по *функциональному назначению* можно выделить следующие типы устройств[1]:

- сенсоры – преобразователи внешнего физического воздействия в удобный для измерения (чаще электрический) сигнал;
- актюаторы (активаторы) – преобразователи управляющего (чаще электрического) воздействия в требуемое физическое;
- миниатюрные управляемые компоненты (микрореле, микрозеркала, затворы, фильтры и т.д.);
- микромашины и микромеханизмы – микроустройства, предназначенные для передачи и преобразования механической энергии (зубчатые передачи, рычаги, микродвигатели, микротурбины, транспортеры и т.д.);
- аналитические микросистемы – сложные микросистемы, предназначенные для диагностики и анализа (многосенсорные системы, микроспектрометры, биочипы и т.д.);
- технологические микросистемы – сложные микросистемы, предназначенные для производства, переработки и преобразования веществ (микролаборатории, микроинструменты, микрореакторы и т.д.);
- миниатюрные автономные микросистемы, микророботы (миниатюрные транспортные системы, микророботы для медицинских и других применений).

По иерархической структуре построения МЭМС-устройства классифицируются следующим образом:

- прямого преобразования энергии, сигнала с обратной связью;
 - интегрированные с системой преобразования, накопления, обработки сигнала и управления (интеллектуальные);
 - распределенные, адаптивные (умные поверхности, нейроподобные структуры).
- И, наконец, *по физической природе* функционирования и преобразования энергии:
- микромеханические, электромеханические;
 - пневмо-, акустомеханические;
 - термоэлектромеханические;
 - оптоэлектромеханические;
 - микрофлюидные;
 - химико-биологические и т.д.

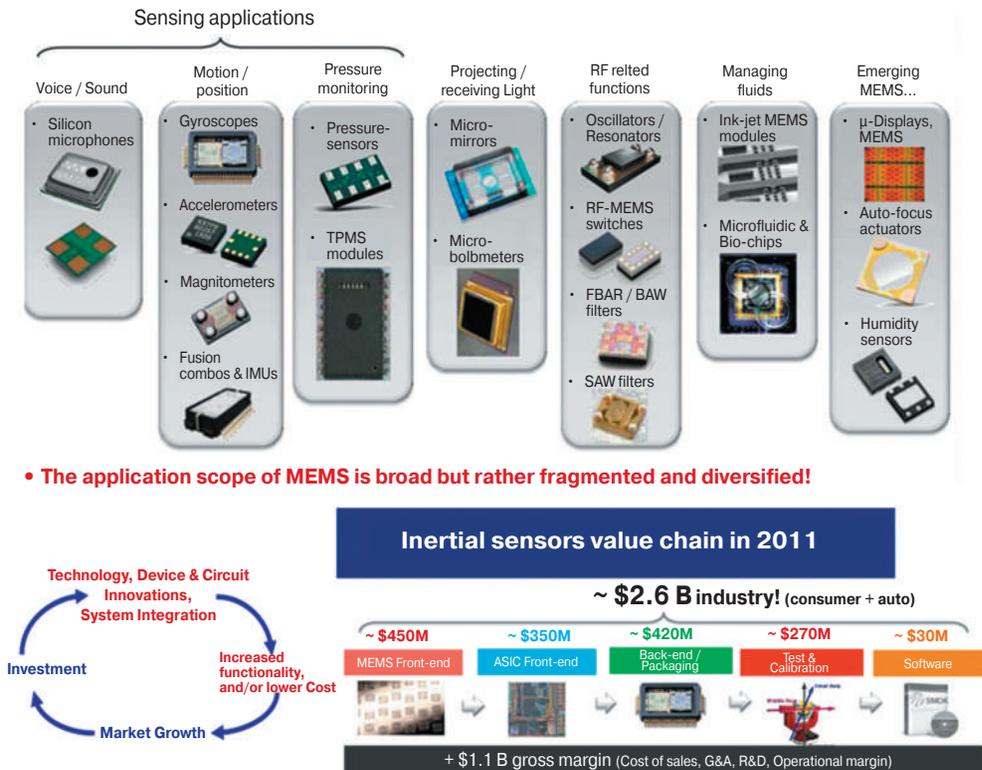


Рис. 1.13. Применение МЭМС в мобильных телефонах [5]

На рис. 1.13 [3] наглядно продемонстрированы результаты «технической экспансии» МЭМС-устройства в такие наукоемкие бытовые изделия, как мобильные телефоны.

В верхнем ряду здесь представлены наиболее массовые модели мобильных телефонов с перечисленными дополнительными функциями и возможностями, появившимися за счет использования в их конструкциях различных МЭМС-устройств.

Первые три модели с сенсорным управлением используют кремневые МЭМС-микросроки (управление звуком), МЭМС-гироскопы, акселерометры, магнитометры (движение и определение позиции), датчики давления и TPMS-модули (мониторинг величины давления).

В четвертой модели в системе управления экраном и режимами подсветки используют МЭМС-зеркала и микроболометры.

На примере пятой модели демонстрируются возможности управления различными режимами беспроводной связи за счет использования RF МЭМС-переключателей, резонаторов, SAW и BAW-фильтров.

Шестая модель здесь демонстрирует возможности использования микрофлюидных кристаллов и био-МЭМС-чипов.

Завершает этот демонстрационный ряд модель мобильного телефона, сконструированного с использованием МЭМС-микродисплея, актюаторов автофокусировки и Humidity-датчиков.

Обращаем внимание читателя на тот факт, что этот слайд взят из научно-технической конференции более чем десятилетней давности (2011 г.) [3]. За прошедшее десятилетие МЭМС-технологии далеко продвинулись на пути внедрения в мобильные цифровые средства и системы связи.

Очевидно, что эти успехи МЭМС-технологий были невозможны без огромных финансовых вложений государств и частных инвесторов ведущих индустриально развитых стран мира в технологии изготовления, корпусирование, тестирование и средства проектирования МЭМС, что отражает диаграмма, представленная в нижнем правом углу этого «старого» слайда.

В качестве основных крупных направлений развития современных МЭМС-устройств, наиболее активно развивающихся за период с 2010 до 2020 г., можно выделить представленные на рис. 1.14 инерциальные МЭМС (INS MEMS), энергетические или аккумуляторные МЭМС (Power MEMS или Energy MEMS), Био-МЭМС (Bio-MEMS), микрофлюидные МЭМС (Microfluidics), СВЧ-МЭМС (RF-MEMS) и микрооптические МЭМС (MO MEMS)

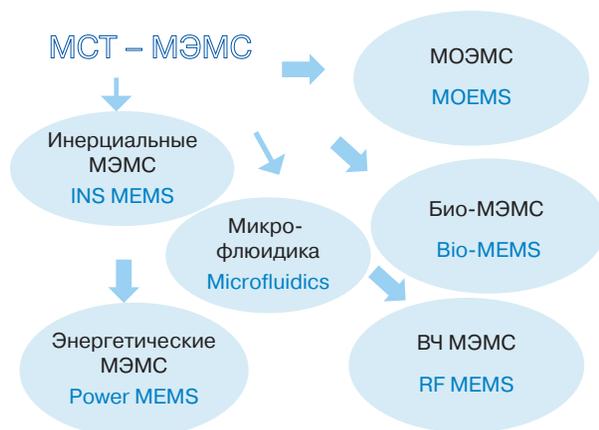


Рис. 1.14. Основные направления развития МЭМС-устройств

Чтобы более наглядно проиллюстрировать роль и место этих разновидностей МЭМС, можно опять обратиться к такой понятной сфере их практических приложений, как мобильная связь.

На рис. 1.15 представлен общий вид материнской платы мобильного телефона с указанием конкретных блоков, компонентов и узлов, выполненных с использованием именно этих, вышеперечисленных технологий МЭМС.

Еще одним ярким примером внедрения МЭМС-технологий в нашу повседневную жизнь являются «автомобильные» приложения МЭМС.

На рис. 1.16 [5] перечислены основные функции, выполняемые МЭМС-устройствами в современном легковом автомобиле. Это контроль уровня и управление температурой в салоне (комфорт), плотность заряда аккумулятора, определение критического линейного (подушки безопасности) и углового (контроль подвески) ускорений, навигация (гироскопы), давление в шинах, а также (масло, топливо), расход топлива, контроль выхлопа автомобиля (NOX) и водителя (алкоголь) и многое другое.



Рис. 1.15. Состав материнской платы мобильного телефона



Рис. 1.16. МЭМС-устройства в автомобиле

На рис. 1.17 [5] представлен общий вид и конструкция типового датчика давления легкового автомобиля, а на рис. 1.18 – упрощенная структура двигательной установки «бензинового» автомобиля с указанием мест расположения основных автомобильных МЭМС-датчиков.

МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ

Автомобиль



Рис. 1.17. Внешний вид и типовая конструкция автомобильного датчика давления

Микросистемная техника

Автомобиль

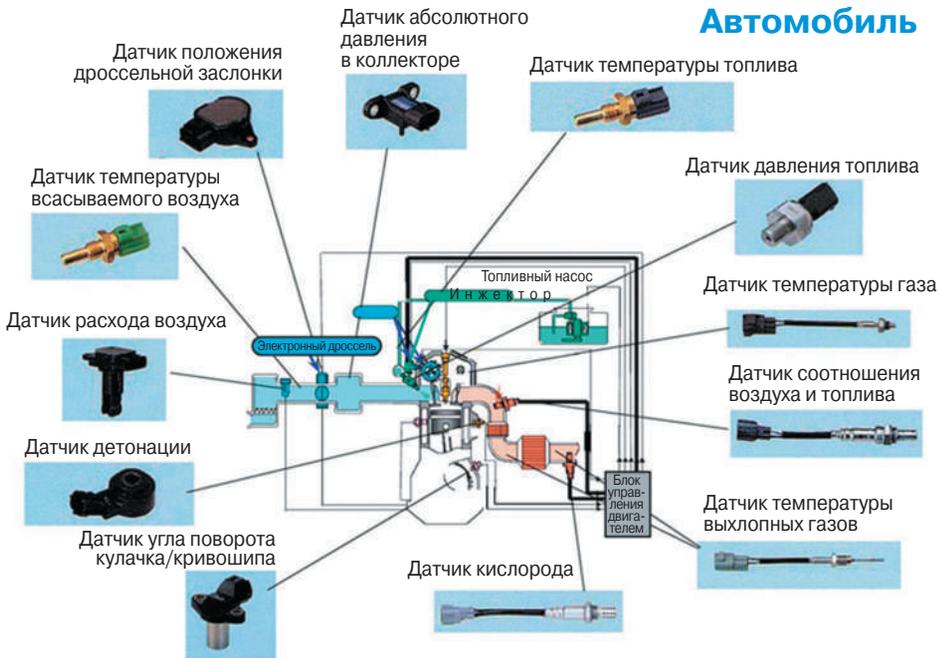


Рис. 1.18. Месторасположение установки основных датчиков системы контроля и управления двигателем автомобиля

Микросистемная техника

Военная техника



Рис. 1.19. Пример применения МЭМС-устройств в системах вооружения

На рис. 1.19 [5] представлены примеры применения МЭМС-устройств в военной технике и современных системах вооружений.

Прежде всего это МЭМС-взрыватели, в состав современного электронного взрывателя обычно входят такие МЭМС-компоненты, как воспламенитель заряда, детонатор, датчики (давления, удара, инерциальные и др.). Применение МЭМС-технологий позволяет на порядок величины уменьшить весо-габаритные характеристики таких боеприпасов при существенном уменьшении их стоимости. Так, для показанного на рис. 1.19 взрывателя типа МК48 разработчикам удалось в 17 раз уменьшить объем устройства при четырехкратном снижении себестоимости.

Как показано на рис. 1.20, современные МЭМС широко применяют в военных системах навигации и связи, дистанционного управления подрывом боеприпасов (мин, снарядов, ракет).

На рис. 1.21 представлен пример применения МЭМС-технологий для реализации различных конструкций микродвигателей и микротрубин. За последнее десятилетие ведущими компаниями мира было реализовано более сотни проектов с общим названием MIT Microengine Project, в ходе которых созданы и освоены в серийном производстве микромеханические двигатели для самых разных отраслей науки и промышленности, медицины и даже для сельскохозяйственных приложений.

Еще одно интересное и многообещающее направление развития МЭМС, которому в этой книге будет посвящена отдельная глава, — это МЭМС-устройства для генерирования и аккумуляции электроэнергии. На рис. 1.22 [5] представлены типовые примеры только одной из многочисленных разновидностей этого класса МЭМС-устройств, созданных в ходе реализации упомянутых проектов под общим названием MIT Microengine Project.



Рис. 1.20. Основные сферы применения МЭМС в военной технике

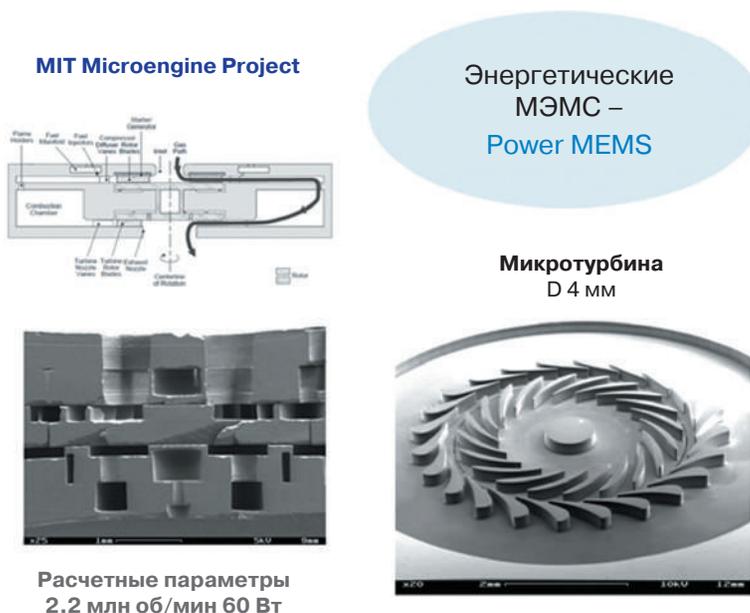


Рис. 1.21. Применение МЭМС для создания микродвигателей и микротурбин

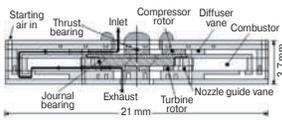
На рис. 1.23 [5] представлены примеры реализации еще одного «самостоятельно-го» класса МЭМС-устройств, а именно – оптических МЭМС (МОЭМС), которому в этой книге также посвящена отдельная «насыщенная» глава.

Здесь показаны элементы одного из наиболее «ранних» продуктов этого перспективного направления, а именно – конструкции МЭМС-микрзеркал.

МЭМС – источники энергии

MIT Microengine Project

Micro-Turbo-Generator



Демонстрация: 1,2 млн об/мин 17 Вт



Компрессор D 8 мм
U2 – 500 м/с



Лопатки h 250 мкм



Турбина D 4 мм

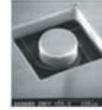
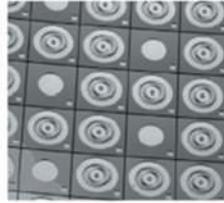


Воздушные подшипники
D 700 мкм
Гидродинамические:
спиральные канавки h 1,5 мкм
Гидростатические:
отверстия p 12 d 12 мкм

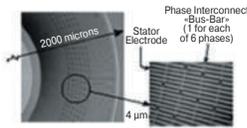


Датчик оборотов и температуры
PolySi 50×50 мкм, h менее 1 мкм

Групповое изготовление элементов



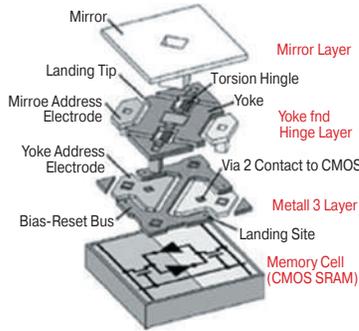
Топливный клапан
2×2 мм, D 1 мм, h 3 мкм
5000 шт. с 1 пластины



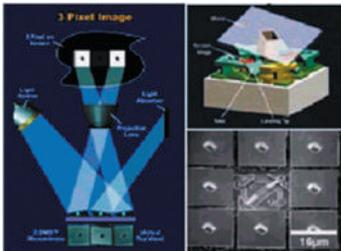
Электрондукционный мотор – генератор
статор D 4 мм, 131-полос, 6-фаз

Расчетные параметры
2,2 млн об/мин 60 Вт

Рис. 1.22. Типовые примеры МЭМС-устройств, полученных в ходе реализации серии проектов и MIT Microengine Project



Цифровое микрозеркальное устройство фирмы TI



1024×1024 микрозеркал

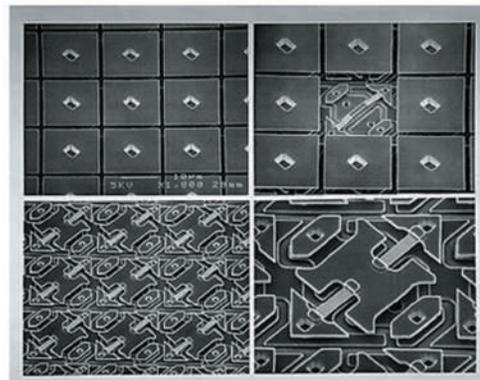


Рис. 1.23. Примеры реализации конструкций МОЭМС-устройств

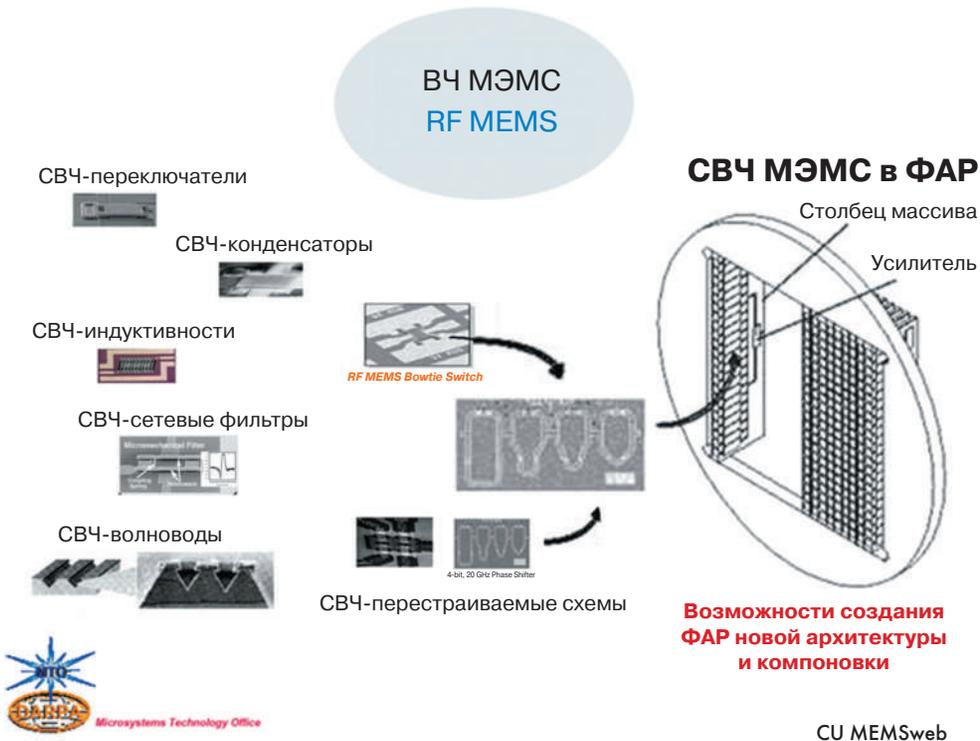


Рис. 1.24. Примеры СВЧ-приложений МЭМС-устройств

На рис. 1.24 [5] представлены примеры применения МЭМС-технологий в системах радиолокации и связи. Прежде всего это СВЧ-переключатели, СВЧ-конденсаторы, сетевые фильтры и волноводы, а также радиочастотные перестраиваемые системы.

Как показано в правом углу этого рисунка, МЭМС-технологии позволяют создавать совершенно новые архитектуры и способы компоновки принимающих и передающих модулей активных фазированных антенных решеток (АФАР) современных радиолокаторов, в том числе мобильных. Этому направлению МЭМС-приложений ниже также будет посвящена отдельная глава.

На рис. 1.25 [5] демонстрируются основные направления применений МЭМС-технологий в микрофлюидике для биомедицинских целей (биофильтры, био-чипы, лаборатории на кристалле, гомогенизаторы, микроклапаны и др.).

Детальному рассмотрению этого направления развития МЭМС-технологий также будет посвящена отдельная глава.

На рис. 1.26 [5] перечислены основные технологические процессы, используемые при изготовлении МЭМС-устройств, которым также в этой книге будут посвящены отдельные тематические главы.

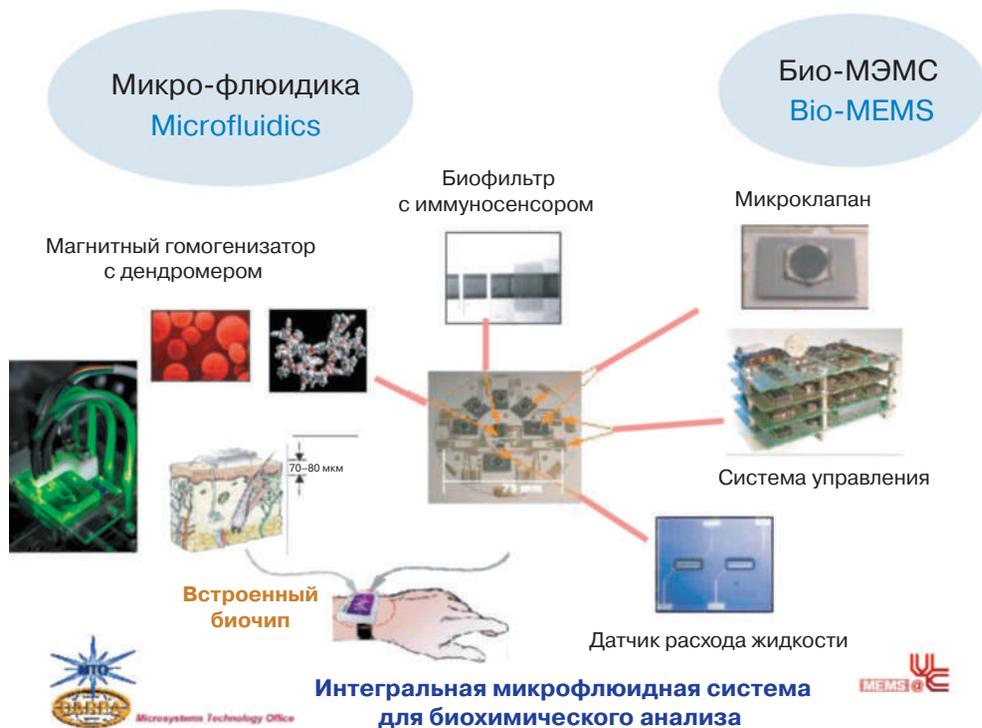


Рис. 1.25. Примеры МЭМС-технологий в микрофлюидике с целью проведения био-медицинских исследований

СПЕЦИФИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ МСТ

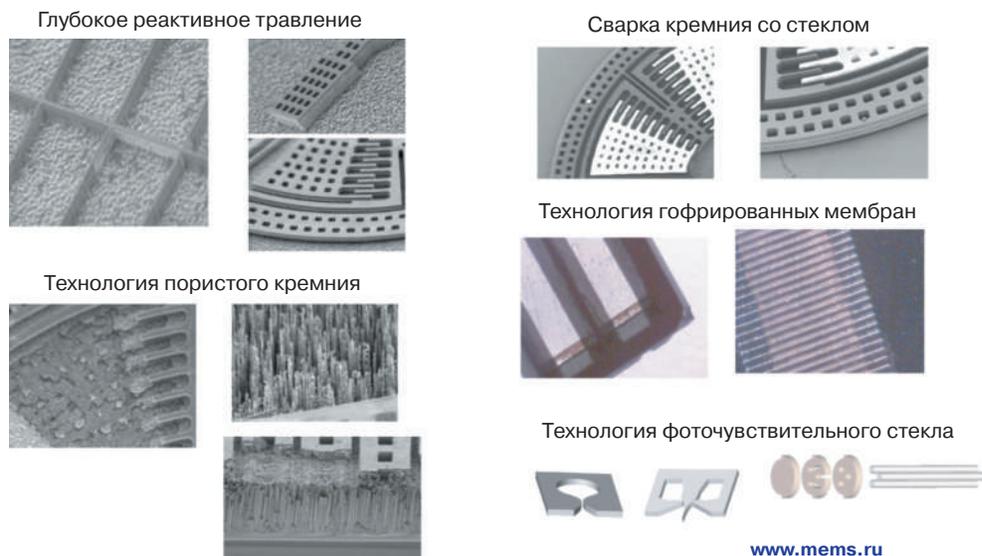


Рис. 1.26. Технологии изготовления МЭМС-устройств

Литература к главе 1

1. Смирнов В.И. Наноэлектроника, нанопотоника и микросистемная техника. Учебное пособие. – Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2017. – гл. 4.
2. Автоматика и программная инженерия. – 2013. – № 3 (5). – С. 68.
3. История развития и области применения технологии MEMS. Саленко Д.С. Аспирант ФГБОУ ВПО НГТУ (Новосибирск, Россия).
4. Бойко А., Гаев Д., Тимошенко С. Корпусирование МЭМС: проблемы и решения.
5. <https://vseprezentacii.com/api/?task=pdf&id=1467326>

ГЛАВА 2

ДАТЧИКИ СИЛЫ И КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА

2.1. Введение

Прежде чем приступить к детальному изучению принципов работы, конструкций и технологий изготовления современных МЭМС-устройств, необходимо хорошо понимать принцип работы их исторических предшественников — классических устройств микромеханики: различных датчиков и сенсоров, поскольку эти же принципы лежат в основе большинства современных микроэлектромеханических датчиков.

Вторая и третья глава этой книги посвящены рассмотрению классических (микромеханических) датчиков силы и крутящему моменту, а также широко распространенным микромеханическим датчикам давления. Появление МЭМС-технологий позволило существенно улучшить технико-экономические параметры этих устройств.

Рассмотрение таких классических микромеханических устройств начнем с наиболее простых датчиков, а именно датчиков силы и крутящего момента.

В современном машиностроении такие физические понятия, как *сила* и *крутящий момент*, до сих пор являются одними из наиболее важных из всех измеряемых величин. Они играют важную роль в производстве различной продукции: от весов и датчиков веса, используемых в промышленности и розничной торговле, до автомобильных и аэрокосмических двигателей, навинчивающихся крышек на флаконах с лекарствами и даже для гаек и болтов. Силы и крутящие моменты могут находиться в широком диапазоне от более 10 кН до менее 1 Нм и от 50 кНм до менее 1 Нм соответственно. Требуемые уровни точности измерений также могут варьироваться в широких пределах, от, скажем, 5% до более 0,01% от полного диапазона шкалы, в зависимости от сферы применения. Гистерезис и различные нелинейные эффекты в механических конструкциях измерительных устройств должны быть небольшими, а разрешение измерений должно быть высоким.

Измерительные устройства также должны быть надежными в эксплуатации, чтобы противостоять изменяющимся воздействиям окружающей среды, таким как температура, вибрация и влажность, а также обеспечивать надежные и точные измерения в течение длительных периодов времени. Силы и крутящие моменты могут быстро меняться, поэтому устройства должны иметь адекватную частоту и рабочие характеристики.

Как известно, существует несколько методов измерения сил и моментов [1]. Часто измеряемую силу преобразуют в изменение длины пружинного элемента. Изменение размеров впоследствии измеряется специальным датчиком, например пьезорезистивным, емкостным или резонансным датчиком. Поэтому неудивительно, что в большинстве устройств измерения силы и крутящего момента исполь-

зуется давно и хорошо зарекомендовавшая себя технология тензорезисторов [2]. К сожалению, металлический тензорезистор обладает низкой чувствительностью, поэтому при его использовании можно получать только несколько милливольт аналогового напряжения перед усилением, и даже датчики не должны подвергаться значительному перенапряжению. Диапазон регулирования и возможности перегрузки серьезно ограничены. Кроме того, такие датчики потребляют относительно большую электрическую мощность (например, 250 мВт).

В целом, измерительные приборы теперь нуждаются в чувствительных устройствах меньшего размера, с меньшим энергопотреблением, большей возможностью регулирования диапазона и перегрузочной устойчивостью. Совместимость с цифровой микроэлектроникой сегодня является обязательной. Иногда необходима бесконтактная и беспроводная работа, а в некоторых случаях желательны устройства без батарей. Производство измерительных устройств с использованием металлических тензорезисторов может быть относительно трудоемким и квалифицированным, а также может требовать использования относительно длительных процедур калибровки.

В последние годы некоторые крупные производители приборов для измерения силы и крутящего момента отошли от использования тензорезисторов, они используют технологии *металлических и кварцевых резонансных камертонов*, а более мелкие компании заняли нишевые рынки, используя технологию *поверхностных акустических волн (ПАВ)*, оптические *технологии* и *магнитоупругие технологии* [3–5]. Продолжаются разработки, направленные на повышение технологичности устройств, а также на повышение их чувствительности и надежности в эксплуатации. Теперь возможны измерения на более жестких конструкциях при гораздо меньших уровнях деформации.

2.2 Тензодатчики

Тензорезисторы на основе полупроводниковых материалов, таких как кремний, в промышленности используются уже давно, и хотя они гораздо дороже и их сложнее наносить на поверхность, чем металлические тензорезисторы, их большим преимуществом является очень высокий коэффициент тензочувствительности, составляющий около ± 130 , что позволяет измерять даже небольшие деформации (например, микродеформацию 0,01) [1].

Следует отметить, что для металлических тензорезисторов этот же коэффициент составляет около 2. В полупроводниковых тензорезисторах большая часть изменения сопротивления происходит за счет эффекта пьезорезистивности [1]. Этот манометр довольно нелинеен при сравнительно высоких уровнях деформации, то есть коэффициент манометра меняется в зависимости от деформации. Например, если манометрический коэффициент составляет 130 при деформации 0,2%, то он составляет около 112 при деформации 0,4%, что является пределом упругости манометра. Кроме того, манометрический коэффициент существенно меняется с температурой около $-0,15\%/^{\circ}\text{C}$, что более чем в 10 раз хуже, чем у металлических манометров. Эту температурную чувствительность можно существенно снизить, используя два датчика, каждый из которых состоит из двух кусков полупроводникового материала, имеющих почти равные, но противоположные по знаку калибровочные коэффициенты.

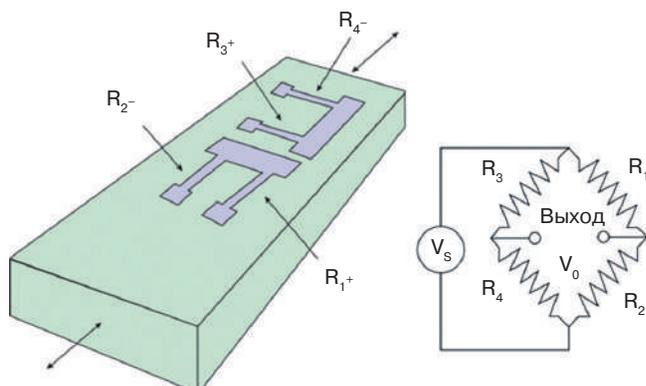


Рис. 2.1. Принцип работы полупроводниковых тензорезисторов с температурной компенсацией (знаки плюс и минус)

Два датчика устанавливаются так, чтобы их оси находились под прямым углом на элементе, подвергаемом воздействию силы, а четыре сопротивления соединяются в мост, как показано на рис. 2.1 [2], все эти сопротивления имеют очень похожие температурные коэффициенты сопротивления. Выходная мощность моста пропорциональна деформации, но из-за изменения температуры возникает небольшой дисбаланс. На практике используются и другие схемы расположения калибров.

Полупроводниковые полосковые тензорезисторы могут быть очень маленькими, длиной от 0,7 до 7 мм и шириной, обычно составляющей одну десятую длины элемента; таким образом, они полезны при измерении высоко локализованных штаммов. В диффузионном полупроводниковом тензодатчике (рис. 2.2) основа n -Si имеет диффузный слой p -Si, и этот слой работает как чувствительный к напряжению проводник, когда его сопротивление измеряется между выводами, прикрепленными к нанесенным металлизациям. Кантилевер с четырьмя диффузионными S -образными датчиками растягивается и сжимается на верхней и нижней поверхностях, соответственно, при изгибной деформации кантилевера под действием силы F . Все датчики идентичны, так как изготовлены на одной подложке и в одном и том же цикле технологического процесса.

В технологии МЭМС кремний используется в качестве механического конструкционного материала из-за его превосходных механических свойств и относительной простоты изготовления небольших механических устройств в больших объемах с помощью процесса микрообработки. Кремний – превосходный пьезорезистивный материал с хорошими механическими свойствами. Аморфный кремний можно наносить непосредственно на механическую деталь, например стекло или пластик. Базовая конструкция такого датчика показана на рис. 2.3 [3].

В качестве чувствительной области обычно используются тонкий слой аморфного кремния (n -, p - или микрокомпенсированный) размером 300×300 мкм и четыре металлических контакта. Два из этих контактов используются для подачи на чувствительный элемент фиксированного тока, а два других, ортогональных предыдущим, выдают на выходе напряжение, пропорциональное механическому напряжению.

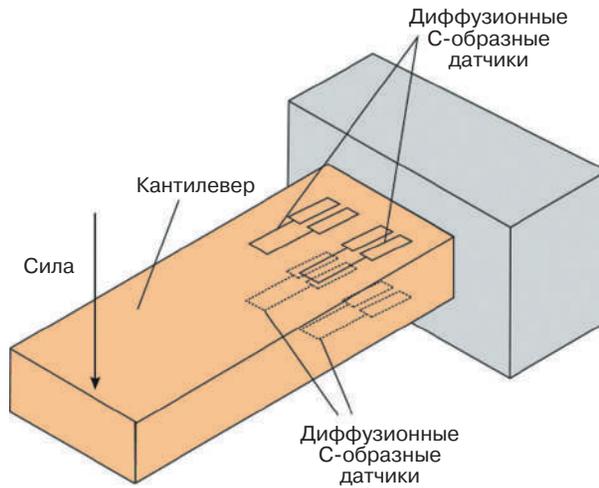


Рис. 2.2. Эскиз конструкции консольного интегрированного тензодатчика

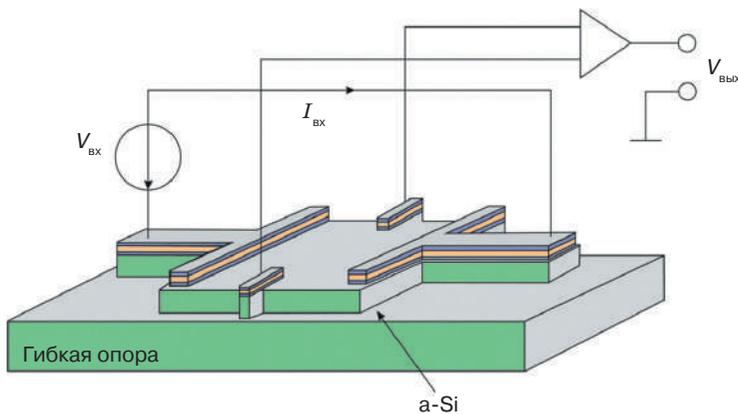


Рис. 2.3. Эквивалентная электрическая схема и структура чувствительного элемента тензодатчика

При приложении механического напряжения происходит анизотропная модификация удельного сопротивления. В тонометрическом преобразователе использован кремниевый пьезорезистивный датчик силы [4]. Поршень покрыт силиконовым гелеобразным клеем и прижимается к датчику силы. На другом конце поршня имеется одноразовый защитный латексный колпачок, позволяющий касаться роговицы глазного яблока. Одновременное использование кремниевых компонентов, изготовленных методом массовой обработки, и миниатюрных высокоточных механических конструкций в гибридной конфигурации может легко решить проблемы промышленных измерений. В качестве примера можно привести датчик микрокрутящего момента, основанный на дифференциальной силе, для использования в часовой промышленности [5] с разрешением лучше 0,5 мкНм в диапазоне от -200 до 200 мкНм. Схема датчика крутящего момента представлена на рис. 2.4.

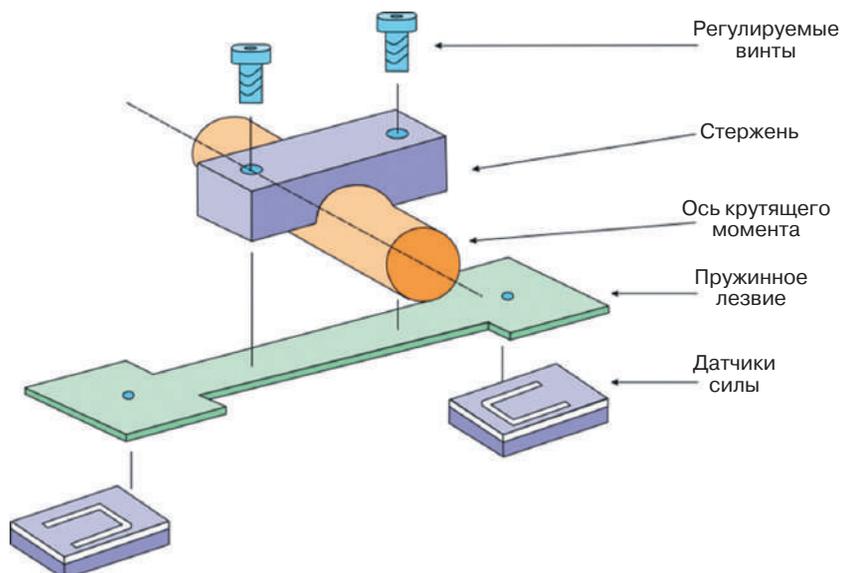


Рис. 2.4. Схематическое изображение конструкции датчика микрокрутящего момента

Он состоит из двух пьезорезистивных датчиков силы. Пружинное лезвие толщиной 100 мкм, изготовленное из меди и бериллия и установленное перпендикулярно оси крутящего момента, преобразует крутящий момент в силу, действующую на два датчика силы. Датчики силы представляют собой микрообработанные кремниевые кантилеверы. Перпендикулярный стержень, установленный на оси крутящего момента, воздействует на лопасть пружины посредством двух регулируемых винтов. Пружинное лезвие воздействует через две точки на два кантильных датчика силы. Крутящий момент, приложенный к оси, увеличит давление на один датчик силы и уменьшит давление на другой.

Тензодатчики — это датчики силы, которые в основном используются в весоизмерительном оборудовании [1]. В большинстве традиционных датчиков веса пружинный элемент изготавливается из стали или алюминия, а в качестве сенсорных элементов используются металлические тензорезисторы.

Кремний не подвержен гистерезису и ползучести, поэтому тензодатчик, изготовленный из кремния, может быть хорошей альтернативой традиционным тензодатчикам, изготовленным из стали. Конструкции из изгибаемых балок можно использовать для нагрузок до 150 кг, но для высоких нагрузок, определенно выше 1000 кг, датчик нагрузки должен быть основан на сжатии кремния, как показано на рис. 2.5 [3].

Этот датчик состоит из двух склеенных кремниевых пластин. Край сенсорного чипа сжимается под воздействием механической нагрузки, и степень сжатия можно измерить, измерив изменение величины емкости между двумя обкладками конденсатора, расположенными в центре. Следует отметить тот факт, что о разработке первого датчика микрокрутящего момента, основанного на измерении дифференциальной силы, сообщалось более 30 лет назад.

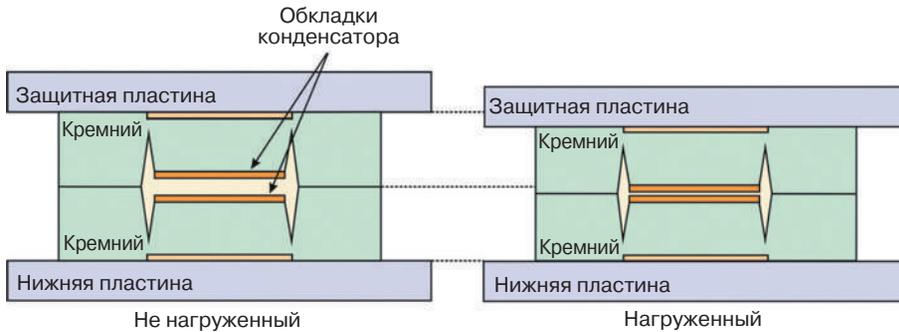


Рис. 2.5. Принцип работы тензодатчика, основанного на сжатии кремния

2.3. Резонансные и ПАВ-датчики

Датчики, использующие эффект сдвига частоты в качестве выходного сигнала, могут быть чрезвычайно чувствительными и обладать широким динамическим диапазоном. Характер выходного сигнала позволяет легко интегрировать эти устройства в современные цифровые системы и обеспечивает достаточную устойчивость к помехам. По этим причинам в промышленности успешно применяются *металлические и кварцевые камертонные резонаторы*, а также сенсоры, использующие технологии *объемного кремния*.

Одним из наиболее массовых датчиков этого типа являются металлические цифровые тензорезисторы. Общий вид металлического трехлучевого резонатора с толстопленочными пьезоэлектрическими элементами для возбуждения и обнаружения вибраций показан на рис. 2.6.

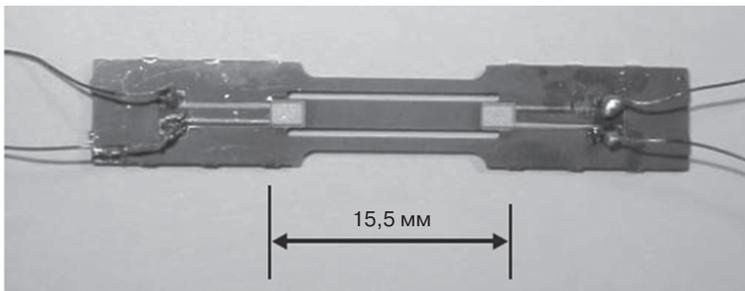


Рис. 2.6. Общий вид простейшего металлического резонатора

Подложка такого резонатора технологически изготавливается обычно методом двустороннего фотохимического травления, а толстопленочные пьезоэлектрические элементы наносятся стандартным способом трафаретной печати. Возможны и другие способы возбуждения и детектирования такого резонатора, например использование оптоволоконна для отражения света от края луча и электромагнитного привода.

Известны также конструкции поверхностно-микромеханических датчиков силы, использующих камертоны в качестве резонансных преобразователей. На рис. 2.7 показана базовая конструкция такого микромеханического датчика.

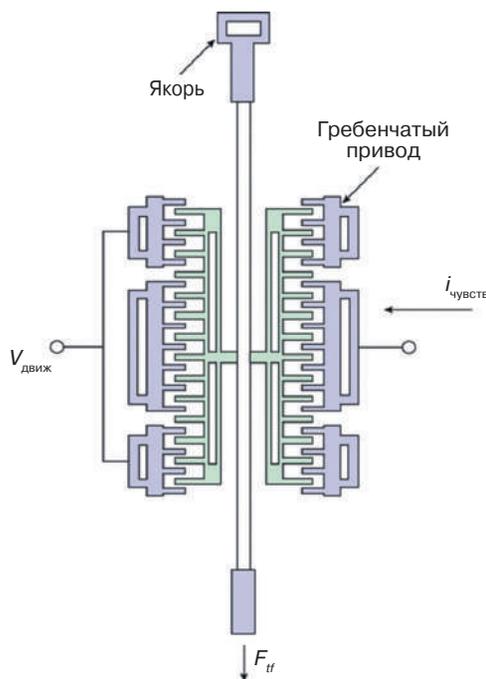


Рис. 2.7. Принцип построения конструкции камертона, изготовленного с использованием технологии поверхностной микрообработки

Один конец конструкции прикреплен к подложке, а другой оставлен свободным для приложения осевой силы. В центре каждой из линий находится электростатический преобразователь, в качестве которого может быть гребенчатый или параллельный пластинчатый привод. Когда этот камертон используется в качестве генератора (режим поперечной балансировки), результирующая частота будет являться функцией приложенной механической силы. Изменение этой частоты является выходным сигналом устройства. Обычно в таких датчиках силы используются два камертона в дифференциальной или двухтактной структуре, так что на выходе устройства наблюдается сдвиг разности частот между ними. Такое расположение компенсирует температурные эффекты и позволяет усиливать измеряемую силу за счет механического воздействия на точку соединения двух вилок.

Еще один широко используемый в промышленности полностью интегрированный кремниевый датчик силы для измерения статической нагрузки при высокой температуре. В этом случае связь нагрузки, возбуждение и детектирование вибрации микрорезонатора объединены в одном монокристаллическом кремниевом корпусе. Полная монокристаллическая конструкция вместе со встроенным в кристалл методом обнаружения одномодового оптического волокна должна позволять проводить измерения при температурах, значительно превышающих $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Здесь перфорированная масса была подвешена на двух балках толщиной $25\text{ }\mu\text{m}$ и длиной $0,5\text{ mm}$. Такая резонансная структура вибрирует с амплитудой 100 nm в резонансе на частоте около 104 kHz с добротностью $30\,000$. Чувствительность нагрузки составляет около 4000 Hz/N [4].



Рис. 2.8. Резонансная конструкция датчика: перфорированная масса, подвешенная на двух балках

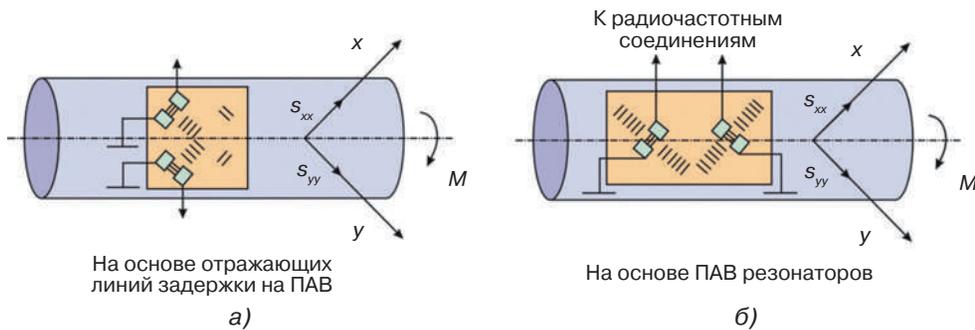


Рис. 2.9. Конструкции чувствительного элемента крутящего момента на основе отражающих линий задержки на ПАВ (а) и на ПАВ-резонаторах (б)

Относительно небольшие ПАВ-резонаторы могут быть использованы для бесконтактного измерения крутящего момента [5–6]. Чувствительность приборов ПАВ к деформации достаточна для проведения измерений на неослабленном валу. Обычно в одном таком датчике используются два устройства на ПАВ, как показано на рис. 2.9, при этом и производится дифференциальное измерение либо фазовой задержки, либо резонансной частоты с целью достижения температурной компенсации и устранения чувствительности прибора к изгибу вала.

Датчики сферической поверхностной акустической волны используют тип поверхностной акустической волны (Spherical Surface acoustic wave SAW), которая распространяется вдоль поверхности любой среды, проявляющей упругость, с экспоненциальной убывающей амплитудой по глубине.

Обычные плоские датчики ПАВ основаны на принципе, согласно которому параметры, такие как амплитуда, скорость и фаза поверхностной акустической волны, изменяются при адсорбции молекул газа. Ограничение датчиков на основе плоской пилы заключается в том, что изменение вышеупомянутых параметров очень

мало из-за ограниченного пути прохождения поверхностной акустической волны плоским датчиком. В случае сферических датчиков поверхностная акустическая волна совершает несколько обходов по экватору шара, как показано на рисунке, что обеспечивает более длинные пути для поверхностной акустической волны, следовательно, еще меньшее изменение параметров усиливается при многократных поворотах, что значительно повышает чувствительность датчика.

Оба типа датчиков SAW основаны на том факте, что крутящий момент M , приложенный к валу, создает две основные компоненты деформации: $s_{xx} = -s_{yy} = s$. В результате одно из устройств ПАВ оказывается под напряжением, а другое — под сжатием, что приводит к противоположному изменению фазовой задержки или резонансной частоты в устройствах. Резонаторы имеют такие же или лучшие характеристики при том же размере подложки и менее требовательны к полосе пропускания и чувствительности приемника. Добротность резонатора обычно составляет около 10 000. Цифровая система опроса датчика крутящего момента может использовать непрерывное частотное отслеживание отраженных частот от двух резонаторов ПАВ, имеющих несколько разные частоты, например 200 и 201 МГц. Для крутящего момента ± 10 Нм и использования кварцевых ПАВ-резонаторов типа ST-X чувствительность устройства к крутящему моменту при комнатной температуре обычно составляет 4,65 кГц/Нм. Эта чувствительность к крутящему моменту имеет температурный коэффициент $0,2\%/^{\circ}\text{C}$. Поэтому необходимо одновременно измерять как крутящий момент, так и температуру, чтобы обеспечить необходимую температурную компенсацию результатов измерений. Необходимо учитывать то обстоятельство, что устройства SAW могут выйти из строя, если напряжение в подложке превышает примерно 1500 микродеформаций. Если датчик должен выдерживать 30-кратную перегрузку, то номинальная деформация может быть равна 50 микродеформациям. Как следствие, ошибка опроса дает погрешность измерения крутящего момента около 1%.

Датчики давления на основе ПАВ (SAW) не требуют элементов питания, дешевые, компактные, хорошо приспособлены для измерения давления в движущихся объектах (шины), что является и основным преимуществом перед емкостными и пьезорезистивными датчиками.

2.4. Оптические микродатчики

Измерение крутящего момента всегда было и остается важной задачей для многих отраслей промышленности, особенно таких, как аэрокосмическая и автомобильная. В частности, производители транспортных средств и поставщики автокомпонентов давно уже используют микродатчики в системах рулевого управления автомобиля с электроусилителем (EPAS). Одним из ключевых компонентов системы EPAS является *датчик крутящего момента* со следующими типовыми характеристиками: диапазон измерения крутящего момента около ± 10 Нм, способность перегрузки по крутящему моменту (без измерения) около ± 110 Нм и максимальная скорость вращения около 90 об/мин. Кроме того, датчик должен соответствовать требованиям спецификаций экологической и электромагнитной совместимости (ЭМС),

а оптические методы в значительной степени невосприимчивы к таким помехам. Также для повышения надежности желателен бесконтактный датчик.

Во многих таких системах давно успешно используются *оптические датчики* для измерения относительного углового перемещения между концами торсиона при приложении крутящего момента к валу [7]. Торсион — это часть вала, предназначенная для увеличения углового смещения при заданном крутящем моменте — например, поворот примерно на $2,5^\circ$ для приложенного крутящего момента 10 Нм. На валу установлены два вращающихся диска; один из которых механически связан с каждым концом торсиона. Каждый вращающийся диск имеет ряд прорезей, образующих две дорожки с чередующимися прозрачными и непрозрачными зонами. Оптическая схема такова, что принимаемая интенсивность света связана с крутящим моментом, направление крутящего момента может быть определено, а изменение интенсивности источника света исключается из выходного сигнала датчика крутящего момента. Здесь можно привести пример двулучепреломляющего датчика крутящего момента, который использует фотоупругий полимер, освещаемый поляризованным светом и испытывающий крутильную деформацию.

Прибор работает следующим образом. Двумерный рисунок полос просматривается через оптический поляризатор. Деформация, вызывающая наблюдаемую картину изображения, является сложной функцией крутящего момента, приложенного к валу. Современную нейронную сеть можно обучить с помощью шаблонов полос для активации приложенного крутящего момента как для статических валов (уровень точности 1%), так и для вращающихся валов со скоростью до 1500 об/мин (уровень точности 4%). Одной из наиболее известных разновидностей таких приборов является оптический датчик крутящего момента, использующий модифицированный метод муаровых полос для измерения крутящего момента на вращающемся валу [6]. В системе используются две круглые решетки, установленные концентрически на обоих концах торсионного вала; одна решетка имеет радиальные направляющие, а другая имеет направляющие, касательные к малому центральному образующему кругу. Образуются круговые полосы, которые перемещаются радиально по мере углового смещения зарядов решеток; движение полосы можно считать с помощью матрицы ПЗС. Два 11-битных оптических энкодера абсолютного положения использовались для измерения крутящего момента с помощью торсиона [7]. Семь дополнительных битов обеспечивают определение интерполяционного (относительного) положения между соседними кодами. Микросхема обработки датчика вычисляет два оптически закодированных положения для скоростей до 1600 об/мин.

2.5. Емкостные датчики измерения

Бесконтактное *измерение крутящего момента* на вращающемся валу также может быть достигнуто за счет использования емкостного датчика, хотя чувствительность телеметрических цепей к радиочастотным и электромагнитным помехам может быть проблемой [8, 9]. Крутящий момент можно измерить с помощью набора электродов на одном конце торсиона, соединенного с валом, и второго набора электродов на внешней стороне тонкой трубки из диэлектрического материала [10]. Эта трубка закреплена на валу на другом конце торсиона. Один набор электродов перемещается

относительно второго набора при приложении крутящего момента, так что между двумя наборами электродов возникает изменение емкости.

Емкость является частью резонансного контура, индуктивно связанного с катушкой в неподвижной части. На каждом конце торсиона может быть установлен бесконтактный емкостной датчик углового смещения, а крутящий момент контролируется по электрическому изменению фазы.

В таких датчиках кремниевая микрообработка использовалась для реализации дифференциально-емкостного датчика силы. Принцип работы датчика силы переменного зазора показан на рис. 2.10. Конденсаторы состоят из двух электрически изолированных тонких пластин (электродов) с очень небольшим расстоянием между ними. Если одна емкость увеличивается, другая уменьшается.

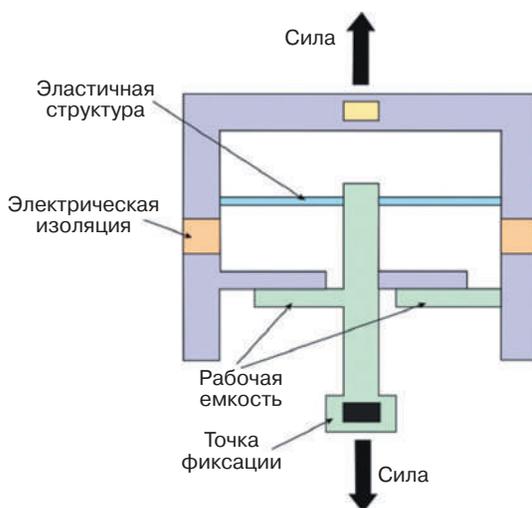


Рис. 2.10. Принцип реализации измерения силы на основе конденсатора с переменным зазором

Следует отметить, что дифференциальное считывание, организованное на основе встроенной емкости, обеспечивает лучшую линейность и более высокую чувствительность. Например, зазор в 10 мкм дает емкость 1 пФ. Таким образом можно производить измерения силы в широком диапазоне от 0,01 Н до 10 Н, а чувствительный элемент можно использовать в качестве тактильного датчика.

Например, типовой серийно выпускаемый микромеханический кремниевый тензодатчик предназначен для измерения нагрузок до 1000 кг [11]. Чувствительная поверхность содержит матрицу (или массив) емкостных чувствительных элементов, что делает такой тензодатчик нечувствительным к неоднородному распределению нагрузки. Принципиальная схема подобного тензодатчика показана на рис. 2.11. Здесь конструкция реализована в виде двух пластин, склеенных друг с другом, где нагрузка приложена к площади в центре чипа. В этой области верхняя пластина содержит набор полюсов, несущих нагрузку. Нижняя пластина содержит матрицу электродов, которые образуют массив конденсаторов, а верхняя пластина является общим электродом.

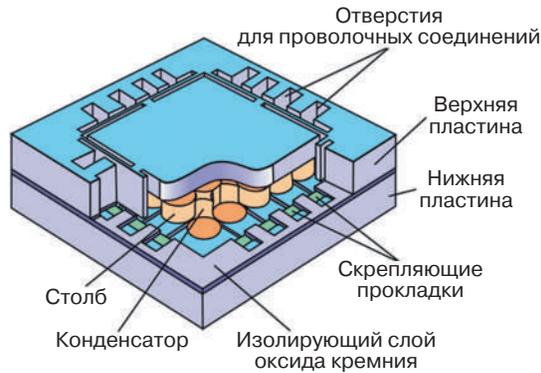


Рис. 2.11. Конструкция датчика с распределенной емкостной нагрузкой

При приложении нагрузки полюса сожмутся и расстояние между металлическими электродами и верхней пластиной в месте расположения конденсаторов уменьшится, тем самым увеличив емкость. Каждая емкость измеряется индивидуально, а общая емкость определяется как сумма обратных значений отдельных конденсаторов. В этом случае всегда на выходе получается общая нагрузка, даже если она будет распределена неравномерно. В такой стандартной конструкции обычно имеется 25 полюсов диаметром 2 мм каждый и высотой 200 мкм, что приводит к изменению высоты 0,2 мкм при нагрузке 1000 кг. Расстояние между обкладками конденсатора составляет 1 мкм, а значения емкости порядка нескольких пикофарад. Повторяемость лучше 0,05% была достигнута при использовании конструкции с большим количеством конденсаторов меньшего размера. Эту конструкцию разработчик может легко адаптировать для любых более высоких нагрузок просто за счет увеличения площади чипа или использования нескольких чипов в одном корпусе.

На рынке можно встретить также так называемые трехмерные емкостные датчики силы с несколькими степенями свободы с использованием технологии соединения оптического волокна с чипом. Такой датчик предназначен для работы в диапазоне усилий от 0 до 500 мкН и крутящего момента от 0 до 10 мкНм. Одно из популярных в ветеринарии и животноводстве применений этого датчика — получение силовой обратной связи во время микроманипуляций с большими яйцеклетками или во время инъекции спермы. Здесь использовано упруго подвешенное твердое тело, способное перемещаться по всем шести степеням свободы при соединении со стекловолокном. Несимметричные гребенчатые конденсаторы позволяют развязать смещения в направлениях x и y , а направление z можно определить с помощью плоских электродов, расположенных под чипом.

2.6. Магнитные датчики

Датчики крутящего момента, как правило, представляют собой достаточно габаритные компоненты. В большинстве практических случаев вал, на котором необходимо измерить крутящий момент, приходится разрезать, чтобы установить такой датчик крутящего момента между двумя полученными деталями. Кроме того, сигнал передается контактными кольцами или коаксиальным трансформатором [12].

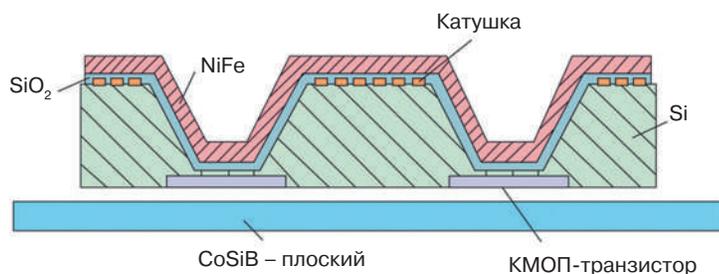


Рис. 2.12. Эскиз конструкции микрообработанной сенсорной головки датчика крутящего момента

Датчик крутящего момента с *магнитной головкой* позволяет валу оставаться единым целым и принимать сигнал без контактных колец [13–18]. Этот принцип основан на сильных магнитоупругих свойствах некоторых ферромагнитных материалов, таких как ленты из аморфного сплава CoSiB. Эта лента обладает сильными магнитоупругими свойствами и преобразует крутящий момент в изменение проницаемости μ . Конструкция подобного устройства показана на рис. 2.12 [14].

Установленная над лентой сенсорная головка из ферромагнитного материала с катушками возбуждения и индукции позволяет регистрировать изменение проницаемости, вызванное механическим воздействием, без контакта с лентой. Иногда на практике проблема возникает с изменением воздушного зазора между головкой датчика и аморфной лентой, прикрепленной к валу. Эти изменения воздушного зазора обычно составляют ± 10 мкм, и при приложении крутящего момента происходит модуляция сигнала индукционной катушки. Плотность магнитного потока измеряется непосредственно в воздушном зазоре под полюсными наконечниками и в поле рассеяния с помощью стандартных КМОП-транзисторов, поскольку уровень сигнала индукционных катушек слишком мал. Это устройство состоит из КМОП-транзисторов, расположенных на передней стороне кремниевой пластины и планарных катушек возбуждения, объединенных с ферромагнитным хомутом и расположенных на задней стороне пластины.

Для измерения крутящего момента две головки датчика перемещают под углом $\pm 45^\circ$ к оси вала. Эти направления показывают максимумы растягивающих и сжимающих напряжений на валу. Крутящий момент пропорционален растягивающему напряжению. Усовершенствования были достигнуты за счет замены MAGFET резисторами магнитного поля (MAGRES), которые имеют более низкие уровни шума [18]. Эта система датчиков крутящего момента была изготовлена из кремния – плоские катушки, хомут NiFe, магнитные датчики – все было интегрировано в один чип, что позволяет избежать распространенных проблем, таких как телеметрия или громоздкая конструкция. Здесь были использованы сверхчувствительные *пьезорезистивные кантилеверы* микрофабрикатов для торсионной магнитометрии [19].

Базовое устройство показано на рис. 2.13 и предназначено для определения крутящего момента по двум осям, x и y . Ножки имеют прорезы для улучшения чувствительности рычагов, которые выступают из несущего чипа, вытравленного из кремниевой пластины. Два пьезорезистора – R_1 и R_2 изготовлены путем локального легирования кремния бором.

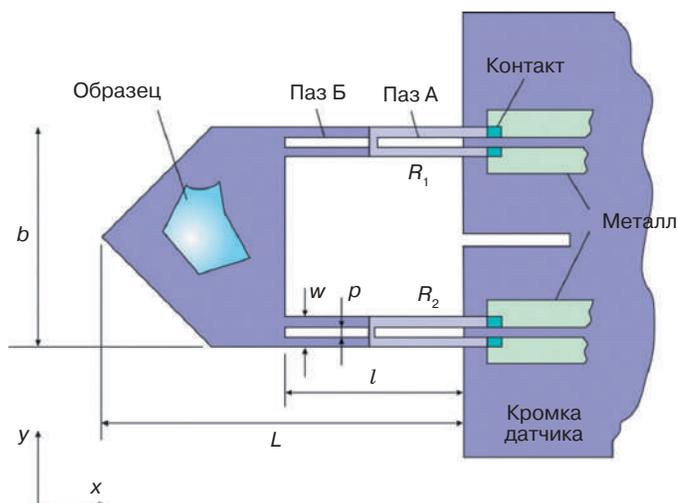


Рис. 2.13. Эквивалентная схема конструкции пьезоэлектрического кантилевера для моментной магнитометрии: двухветвевой кантилевер с двумя пьезорезисторами для независимого измерения изгиба и кручения

Процесс механического изгибания и/или кручения рычага создает в балках механическое напряжение, которое за счет пьезорезистивного эффекта изменяет сопротивление пьезорезистивов на ΔR . Крутящий момент вокруг оси x легко можно определить, измерив разницу $\Delta(R_1 - R_2)$. Скручивание создает механическое напряжение с противоположным знаком, симметрично расположенное вокруг середины рычага. Чувствительность ($\Delta R/R$) к кручению обычно имеет значение $1,5 \cdot 10^{-6}$ на пНм. Значения пьезосопротивления обычно составляют от 2 до 3 кОм, а резонансная частота составляет около 78 кГц, поэтому устройство имеет малое время отклика. Чувствительность достаточно высокая (до $\approx 10-14$ Нм). Внешнее магнитное поле, приложенное к образцу, обладающему магнитным моментом, создает на нем и на кантилевере крутящий момент.

2.7. Атомно-силовой микроскоп и сканирующие зонды

В промышленности растет потребность в измерении и характеристике все более тонких слоев, что предъявляет значительные требования к приборам, измеряющим и характеризующим эти слои и поверхности. *Сканирующий силовой микроскоп (ССМ)*, в состав которого входит *атомно-силовой микроскоп (АСМ)*, стал хорошо зарекомендовавшим себя методом анализа поверхностей. По сути, кантилевер либо динамически сканирует вибрацию по поверхности образца, либо сканирует поверхность в режиме статического контакта. Циклический контактный SFM не может повредить поверхность мягких образцов, как контактный SFM. Миниатюрные автономные SFM необходимы для использования при проверке пластин, SFM в сверхвысоком вакууме и в жидких средах. Консоли измерения силы для миниатюрных SFM включают в себя следующие кантилеверы: *пьезорезистивный тип, пьезоэлектрический тип и емкостный тип.*

Пьезоэлектрический кантилевер может выполнять изменение расстояния между образцами по оси z с помощью наложенного постоянного напряжения, когда кантилевер одновременно выполняет измерение собственного усилия. Для миниатюрных динамических SFM необходимо использовать всего лишь один пьезоэлектрический микрокантилевер и сканер по осям x - y [20].

Простейшая принципиальная схема типового циклического контактного SFM с датчиком силы PZT показана на рис. 2.14, где также показан кремниевый микромеханический датчик силы PZT. Для резонансной вибрации в воздухе преобладающим является вязкостное и акустическое демпфирование, и добротность микрокантилевера Q обычно равна 200 при резонансной частоте 60 кГц. Чувствительность такого кантилевера составляет 0,6 фКл/нм, а типовая жесткость пружины кантилевера 5 Н/м. Разрешение по вертикальной амплитуде такой микрокантилеверной системы обычно составляет около 0,2 нм (2 Å). Диапазон амплитуд колебаний составляет около 100 нм. Магнитно-силовой микроскоп (МСМ) сегодня широко используется как простой метод исследования полей рассеяния на поверхности магнитных образцов с субмикронным разрешением.

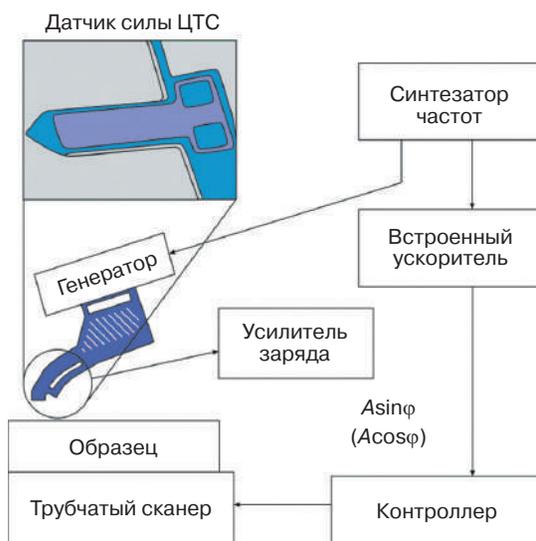


Рис. 2.14. Принципиальная схема конструкции циклического контактного SFM с датчиком силы ЦТС с использованием метода обнаружения пьезоэлектрического заряда

Дополнительным методом, который является одновременно неинвазивным и количественным, является *сканирующий зондовый микроскоп Холла (SHPM)*, который способен получать магнитные изображения с высоким пространственным разрешением.

Пьезорезистивные кантилеверы АСМ обычно изготавливаются из кремния р-типа. Типовой вид консоли ШПМ показан на рис. 2.15. На виде сверху здесь показаны два основных датчика, необходимые для двойного магнитного и топографического изображения. Первый датчик Холла, расположенный крест-накрест возле

конца кантилевера, имеет электрический контакт через четыре золотых вывода по обе стороны кантилевера. Пьезорезистор расположен в основании кантилевера, где изгибающие напряжения максимальны. На самом конце кантилевера находится острый (диаметр < 100 нм) наконечник АСМ, который, наклоняя кантилевер, используется для картирования поверхности образца. При амплитуде возбуждения 1 нм резонансная частота кантилевера составляла 20 кГц при добротности 400 на воздухе. Химические изображения, а также топографическую информацию о твердых поверхностях также можно получать с помощью SFM.

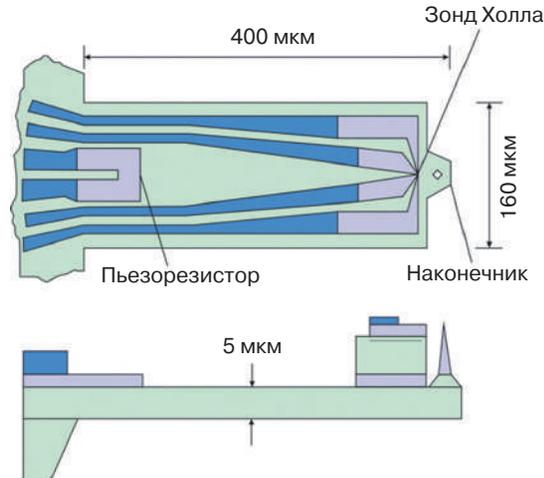


Рис. 2.15. Вид консоли ШПМ в плане и сбоку (вертикальная ось не в масштабе). В основании кантилевера изготовлен пьезорезистор. Зонд Холла и наконечник расположены на самом конце кантилевера. Зонд Холла и пьезорезистор электрически связаны через контакты из сплава Au/Ge

2.8. Тактильные датчики

Интенсивная миниатюризация современных электронных устройств требует соответствующего обращения с микродетальями при изготовлении и сборке. Действительно, исследование на атомном уровне требует более точного манипулирования образцом с помощью «наноробота», имеющего, скажем, разрешение много меньше 10 нм и рабочее пространство 1 см^3 . Требуется микромеханические захваты, и когда захват зажимает или касается объекта, определение силы будет большим преимуществом. За последние 20 лет были разработаны разные варианты тактильных микрозахватов со встроенными приводом и датчиком [21]. Используются термобиморфный привод и пьезорезистивный датчик силы. Например — кремниевый лучевой палец толщиной 6 мкм и шириной 250 мкм имеет ход 300 мкм и постоянную времени 11 мс. Сила захвата составляет около 250 мкН, и ее улавливают диффузионные борные пьезорезисторы в мосту Уитстона. Например, такой кремниевый микромеханический пьезоэлектрический тактильный датчик уже более 10 лет назад был встроен в кончик эндоскопического захвата, используемого хирургом для манипулирования тканями [22]. Захват имел обычную жесткую зубчатую по-

верхность (рис. 2.16) и состоял из верхнего слоя кремния, подложки из плексигласа и узорчатой пленки из поливинилиденфторида (ПВДФ), зажатой между двумя слоями. Динамический диапазон силы составлял от 0,1 Н до 2 Н, разрешение 0,1 Н и полоса пропускания от постоянного тока до нескольких мегагерц.

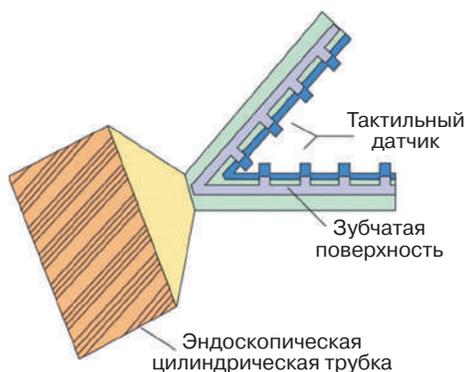


Рис. 2.16. Схема конструкции эндоскопического захвата со встроенным тактильным датчиком в форме зуба

Кремниевая подложка, обычно ранее широко используемая для микромеханических тактильных датчиков, жесткая и, следовательно, механически хрупкая, не способна выдерживать большие деформации и внезапные механические удары. Поэтому была разработана двумерная тактильная сенсорная матрица, основанная исключительно на полимерной (полиимидной) микрообработке и тонкопленочных металлических резисторах [23]. Принципиальная схема одиночного такселя представлена на рис. 2.17. Экспериментально было установлено, что величина плоских поверхностных напряжений наибольшая на периферии мембраны. Эффективный калибровочный коэффициент такселей составляет примерно 1,3.

Обычно линейная чувствительность датчиков сопротивлением 10 кОм составляет около 0,02 мВ/мкН на выходе моста Уитстона с одним датчиком и напряжением возбуждения 10 В. Точное и недорогое измерение многоосных перемещений и сил является важной задачей для многочисленных микросистем, которые включают в себя различные очень маленькие механические конструкции, выполняющие сложные траектории движения.

В качестве демонстрации возможностей таких приборов можно привести разработанный много лет назад шестиосный (три поступательных движения и три вращения) тактильный датчик с использованием излучающих и детектирующих микрополей элементов на отдельных чипах, базовая структура которого показана на рис. 2.18. Здесь эмиттер поля представляет собой крестообразный проводник, на который подается переменный ток. Детекторная матрица состоит из восьми полевых транзисторов с открытым затвором, каждый из которых вырабатывает ток стока, пропорциональный заряду, индуцированному в его затворе локальным электрическим полем. На основе структуры выходных сигналов полевых элементов легко можно определить положение и ориентацию полевых эмиттеров относительно матрицы полевых детекторов с некоторой избыточностью.

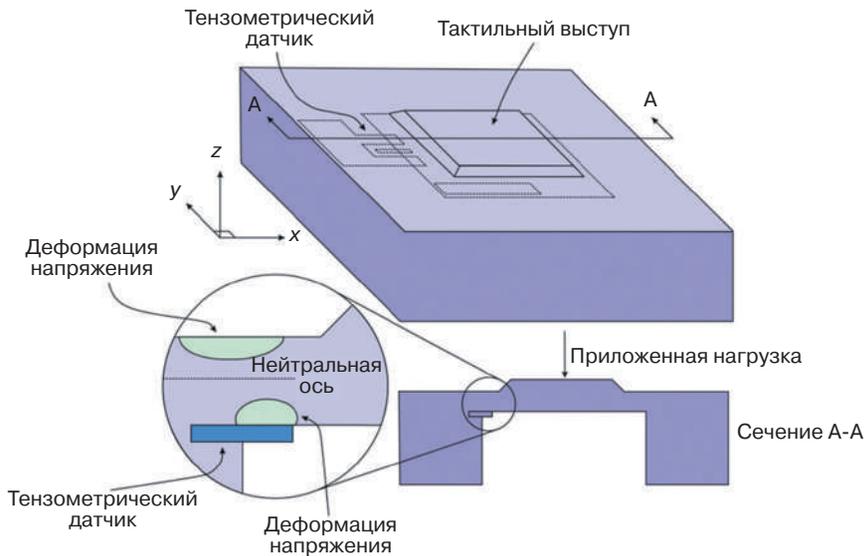


Рис. 2.17. Принципиальная схема одного такселя

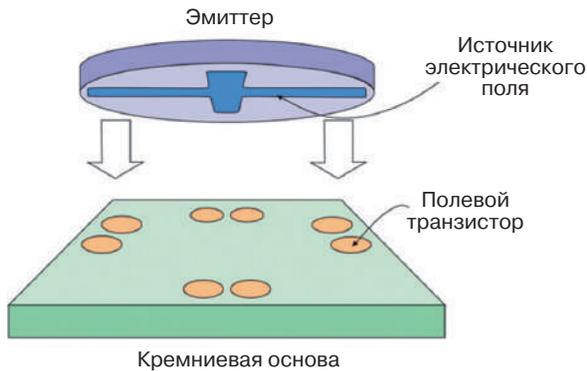


Рис. 2.18. Принцип построения конструкции многоосного датчика деформации

Податливость эластомерного материала, разделяющего две стружки, определяет чувствительность к силам и крутящим моментам.

Из краткого исторического обзора, проведенного в этой главе, можно сделать очевидный вывод, что технологии MEMS еще более 10 лет назад начали играть важнейшую роль в измерениях силы и крутящего момента. Помимо решения многочисленных задач промышленного взвешивания, рулевого управления с усилителем, привода вала, силовых/моментных приводов и фиксации крепежных деталей, датчики начали активно использоваться в ряде передовых для того времени приложений, таких как силовая микроскопия, точные и динамические манипуляции с хрупкими предметами или нестандартными объектами неправильной формы с помощью микрозахватов [24] и роботизированных рук [25]. «Умные» конструкции в аэрокосмической отрасли [26] нуждаются в недорогих интегрированных системах датчиков силы/момента, а микросистемные технологии будут находиться в авангар-

де разработки новых датчиков. За прошедшие 20 лет были созданы новые подходы и новые приложения. Миниатюризация и интеграция нескольких технологий, таких как микрообработка кремния, микроэлектроника, оптические волокна и тонкие/толстые пленки, были положены в основу этих разработок.

Литература к главе 2

1. Guide to the Measurement of Force, London, England: The Institute of Measurement and Control, 1998.
2. Kanda Y. Graphic Representation of the Piezoresistance Coefficients in Silicon // IEEE Trans. on Electron Devices. – 1982. Vol. 29. No. 1. – P. 64–70.
3. Elwenspoek M. and Wiegerink R. Mechanical Microsensors. – Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2001. – P. 97–106.
4. Hachol A. and Dzik R. Metrological Properties Study of a Planatic Tonometric Transducer Operating with Micromachined Force Sensor // Conference Optoelectronic and Electronic Sensors II, Szczyrk, Poland, May 13–16. 1996. SPIE. Vol. 3054. 1996. – P. 104–110
5. Gass V. et al. Micro-Torque Sensor Based on Differential Force Measurement // Proc. IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, Oiso, Japan. January 25–28. 1994. – P. 241–244.
6. Spooncer R.C., Heger R. and Jones B.E. Non-Contacting Torque Measurement by a Modified Moiré Fringe Method // Sensors and Actuators. – 1992. Vol. A31. No. 1–3. – P. 178–181.
7. Mortara A. et al. An Opto-Electronic 18b/Revolution Absolute Angle and Torque Sensor for Automotive Steering Applications // IEEE Intl. Conf. Solid-State Circuits, San Francisco, CA. February 7–9. 2000. – P. 182–183, 445.
8. Meckes A. et al. Capacitive Silicon Microsensor for Force and Torque Measurement // Proc. TRANSDUCERS '01 – Eurosensors XV, Munich, Germany. June 10–14. 2001. – P. 498–501.
9. Cermak S. et al. Capacitive Sensor for Torque Measurement // Proc. Intl. Measurement Confederation XVI IMEKO World Congress, Vol. III, Vienna, Austria. September 25–28. 2000. – P. 25–28.
10. Turner J.D. and Austin L. Sensors for Automotive Telematics // Measurement Science and Technology. – 2000. Vol. 11. No. 2. – P. R58–R79.
11. Wiegerink R. et al. Quasi-Monolithic Silicon Load Cell for Loads Up to 1000 kg with Insensitivity to Non-Homogeneous Load Distributions // Proc. 12th IEEE Intl. Conf. Micro Electro Mechanical Systems, Orlando, FL. January 17–21. 1999. – P. 558–563.
12. Schicker R. and Wegener G. Measuring Torque Correctly. – Darmstadt, Germany: Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM) GmbH, 2002.
13. Sasada I., Uramoto S. and Harada K. Noncontact Torque Sensors Using Magnetic Heads and a Magnetostrictive Layer on the Shaft Surface-Application of Plasma Jet Spraying Process // IEEE Trans. on Magnetics. – 1986. Vol. 22. No. 5. – P. 406–408.
14. Rombach P., Steiger H. and Langheinrich W. Planar Coils with Ferromagnetic Yoke for a Micromachined Torque Sensor // J. Micromech. Microeng. – 1995. Vol. 5. No. 2. – P. 136–138.
15. Rombach P. and Langheinrich W. Modeling of a Micromachined Torque Sensor // Sensors and Actuators. – 1995. Vol. A46. No. 1–3. – P. 294–297.